



Учреждение образования
«Международный государственный
экологический институт
имени А. Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета

А. Г. Сыса

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ И ОЦЕНКА РИСКОВ
ТЕХНОГЕННОГО
И РАДИОНУКЛИДНОГО
ЗАГРЯЗНЕНИЯ**



Учреждение образования
«Международный государственный экологический
институт имени А. Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета

А. Г. Сыса

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОЦЕНКА РИСКОВ ТЕХНОГЕННОГО И РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Учебно-методическое пособие

Минск
«ИВЦ Минфина»
2017

УДК 574:504.06 (076)

ББК 28.081я7

С 95

Автор:

кандидат химических наук, заведующий кафедрой радиационной гигиены
и эпидемиологии МГЭУ им. А. Д. Сахарова *А. Г. Сыса*

Рецензенты:

доктор биологических наук, профессор,
профессор кафедры «Экология» БНТУ *С. А. Хорева*;
доктор химических наук, профессор, профессор кафедры биохимии и
биофизики МГЭУ им. А. Д. Сахарова *П. А. Киселев*

Сыса А. Г.

С 95 Моделирование экологических процессов и оценка рисков техно-
генного и радионуклидного загрязнения: Методические указания по
проведению лабораторных работ / А. Г. Сыса. – Минск : ИВЦ Мин-
фина, 2017. – 59 с.

ISBN 978-985-7142-88-0.

Включены задания для лабораторных работ (по вариантам), представлены примеры их выполнения, а также перечень литературы для каждой работы. К рассматриваемой теме предлагается теоретический материал, в котором отражены основные направления изучаемой дисциплины. Актуализируются современные подходы и методы математического моделирования экологических и медико-биологических процессов, построения обоснованного прогноза и проведения на его основе корректирующих мероприятий.

Для студентов специальностей 1–33 01 05 «Медицинская экология», 1–33 01 05 04 «Эпидемиология», а также преподавателям, аспирантам и магистрантам, всем, кто интересуется проблемами медицинской экологии.

УДК 574:504.06 (076)

ББК 28.081я7

ISBN 978-985-7142-88-0

© Сыса А. Г., 2017

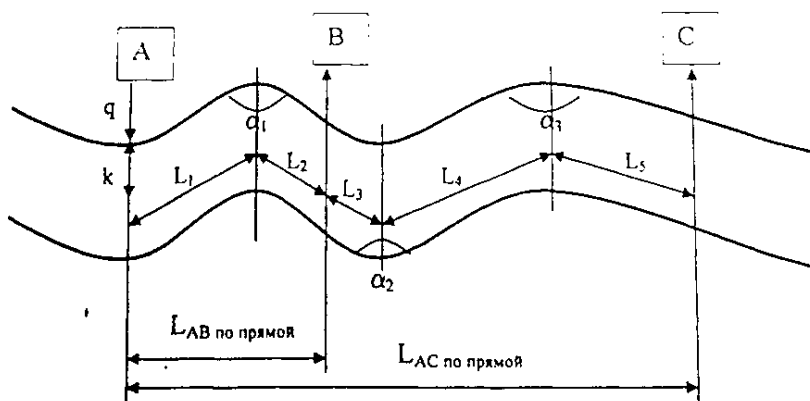
© МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ВОДОЕМА СТОЧНЫМИ ВОДАМИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ.....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ГАЗООБРАЗНЫМИ ВЫБРОСАМИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ.....	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ АВАРИЯХ НА ХИМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ	22
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ОЦЕНКА РИСКА УГРОЗЫ ЗДОРОВЬЮ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОРОГОВЫХ ТОКСИКАНТОВ	35
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ОЦЕНКА РИСКА УГРОЗЫ ЗДОРОВЬЮ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ БЕСПОРОГОВЫХ ТОКСИКАНТОВ (НЕРАДИОАКТИВНЫХ КАНЦЕРОГЕНОВ).....	48
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. ОЦЕНКА РИСКА УГРОЗЫ ЗДОРОВЬЮ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ БЕСПОРОГОВЫХ ТОКСИКАНТОВ (РАДИОАКТИВНЫХ КАНЦЕРОГЕНОВ).....	53

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ВОДОЕМА СТОЧНЫМИ ВОДАМИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Определить соответствие санитарным нормам воды реки в пунктах забора В (для культурно-бытовых целей) и С (для хозяйственно-питьевого водоснабжения), если в пункте А осуществляется сброс сточных вод в створ реки на расстоянии k от берега химическим предприятием и близко расположенным к нему лакокрасочным заводом. На участке АВ река имеет один изгиб под углом α_1 , на участке АС – три изгиба под углами соответственно $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.



Геометрические параметры участков реки и скорость течения отражены в табл. 1.

В сточных водах химического предприятия содержатся следующие органические и неорганические загрязняющие вещества: метанол, ацетон, толуол, ртуть (Hg), мышьяк (As) и твердые взвешенные частицы; в сточных водах лакокрасочного завода – ацетон, керосин и толуол. Предельно допустимые концентрации химических загрязняющих веществ: $ПДК_{\text{метанол}} = 3$ мг/л, $ПДК_{\text{ацетон}} = 0,3$ мг/л, $ПДК_{\text{толуол}} = 0,5$ мг/л, $ПДК_{\text{керосин}} = 0,1$ мг/л, $ПДК_{\text{Hg}} = 0,005$ мг/л, $ПДК_{\text{As}} = 0,05$ мг/л. Допустимая концентрация твердых взвешенных частиц в воде, используемой для культурно-бытовых целей $C_{\text{доп}} = 0,75$ мг/л, для хозяйственно-питьевого водоснабжения $C_{\text{доп}} = 0,25$ мг/л. Допустимое биологическое потребление кислорода в воде, используемой для культурно-

бытовых целей $C_{\text{бпк}} = 6$ мг/л, для хозяйственно-питьевого водоснабжения $C_{\text{бпк}} = 3$ мг/л. Коэффициент допустимого загрязнения органическими веществами C_1 ; минимальный коэффициент разбавления, при котором восстанавливаются органолептические свойства воды, n ; величина сброса q указаны в табл. 2, содержание в нем загрязняющих веществ, а также наличие загрязняющих веществ в реке до сброса указаны в табл. 3.

Таблица 1 – Варианты заданий

Длина участков реки, км	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
	Предпоследняя цифра зачётной книжки +1	Предпоследняя цифра зачётной книжки +2	Предпоследняя цифра зачётной книжки +3	Предпоследняя цифра зачётной книжки +4	Предпоследняя цифра зачётной книжки +5
Ширина участков реки, км	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
	Две последние цифры зачетной книжки +10	Две последние цифры зачетной книжки +13	Две последние цифры зачетной книжки +10	Две последние цифры зачетной книжки +13	Две последние цифры зачетной книжки +16
Глубина участков реки, км	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
	Последняя цифра зачётной книжки +1,5	Последняя цифра зачётной книжки +1,1	Последняя цифра зачётной книжки +1,3	Последняя цифра зачётной книжки +1,1	Последняя цифра зачётной книжки +1,5
Скорость реки на участках, м/с	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
	2,8	2,6	2,6	2,5	2,5

Углы поворота реки:

$$\alpha_1 = 120^\circ$$

$$\alpha_2 = 130^\circ$$

$$\alpha_3 = 140^\circ$$

Таблица 2 – Исходные данные

k , м	C_1	n	q , м ³ /с
13	0,13	27	1,2

Таблица 3 – Содержание загрязнителей в реке и сточных водах

Загрязняющее вещество	Концентрация в реке до сброса, мг/л	Концентрация в сбросе лакокрасочного завода, мг/л	Концентрация в сбросе химического завода, мг/л
Керосин	0,019	7	—
Метанол	0,95	—	15
Толуол	0	11	8
Ацетон	0,02	6	12
Hg	0,0009	—	4
As	0	—	2
Твердые частицы	0,08	—	19

Методические указания

Рассеивание выбросов в водной среде

Концентрацию консервативных веществ в максимально загрязненной части струи после перемешивания определяют по величине кратности разбавления n_p по формуле

$$c = c_{\phi} + (c_0 - c_{\phi}) / n_p, \quad (1)$$

где c_{ϕ} – концентрация загрязняющего вещества до выпуска сточных вод (фоновая), c_0 – концентрация загрязняющего вещества в сточных водах, мг/л.

Для водоемов с направленным течением кратность разбавления n_p можно определить по формуле

$$n_p = 1 + m_c v_v / q, \quad (2)$$

где q – объемный расход сточных вод (величина сброса), $\text{м}^3/\text{с}$; v_v – объемный расход воды в водоеме, $\text{м}^3/\text{с}$; m_c – коэффициент смешения, показывающий, какая часть воды участвует в смешении.

Величину m_c можно рассчитать по методу Фролова-Родзиллера, который основан на решении дифференциального уравнения турбулентной диффузии при следующих допущениях:

- речной поток считается безграничным;
- зона начального разбавления отсутствует (для рек она значительно короче, чем для озер);
- выпуск сточных вод сосредоточенный.

Коэффициент смешения для рек определяется по формуле

$$m_c = \frac{1 - \exp(-k \times \sqrt[3]{L})}{1 + (v_{cb}/q) \times \exp(-k \times \sqrt[3]{L})}, \quad (3)$$

где $k = \varphi \times \mu \times \sqrt[3]{\frac{D_c}{q}}$ – коэффициент, характеризующий гидравлические условия смешения; φ – коэффициент, характеризующий условия сброса (для берегового выпуска $\varphi = 1$, для выпуска в сечении русла $\varphi = 1,5$); μ – коэффициент извилистости русла, $\mu = L / L_n$; L , L_n – расстояния от места выпуска до расчетного створа, м, по фарватеру и по прямой линии; q – величина сброса.

Для равнинных рек и упрощенных расчетов коэффициент турбулентной диффузии находят по формуле М. В. Потапова:

$$D_c = \frac{v_{cp} \cdot H_{cp}}{200}, \quad (4)$$

где v_{cp} – средняя скорость течения водотока на интересующем нас участке между нулевым и расчетным створами, м/с; H_{cp} – средняя глубина на этом участке, м.

$$L_{ab} \text{ (по прямой)} = \sqrt{(L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \cdot \cos \alpha_1)}, \quad (5)$$

$$L_{ac} \text{ (по прямой)} = \sqrt{(L_1^2 + (L_2 + L_3)^2 - 2L_1(L_2 + L_3) \cdot \cos \alpha_1)} + \sqrt{(L_4^2 + L_5^2 - 2L_4L_5 \cdot \cos \alpha_3)}, \quad (6)$$

Количество воды (в м), протекающее через данное живое сечение реки в секунду, называют *расходом реки* (для данного пункта). Теоретически расход (v_v) вычислить просто: он равен площади живого сечения реки (F), умноженной на среднюю скорость течения (v_{cp}), т. е.

$$v_v = F \times v_{cp}. \quad (7)$$

Коэффициент загрязнения органическими веществами:

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{ПДК_i}, \quad (8)$$

где c_i – концентрация веществ в максимально загрязненной части струи после перемешивания, мг/л; ПДК_{*i*} – предельно допустимая концентрация веществ, мг/л.

Пример решения задачи

Задача

Определить соответствие санитарным нормам воды реки в пунктах забора В (для культурно-бытовых целей) и С (для хозяйственно-питьевого водоснабжения), если в пункте А осуществляется сброс сточных вод в створ реки на расстоянии k от берега химическим предприятием и близко расположенным к нему лакокрасочным заво-

дом. На участке АВ река имеет один изгиб под углом α_1 , на участке АС – три изгиба под углами соответственно $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$. Геометрические параметры участков реки и скорость течения:

Длина, км $L_1 = 6; L_2 = 3; L_3 = 6; L_4 = 7; L_5 = 8..$

Глубина, м $H_1 = 6,5; H_2 = 6,1; H_3 = 6,1; H_4 = 6,4; H_5 = 6,8.$

Ширина, м $B_1 = 28; B_2 = 30; B_3 = 30; B_4 = 32; B_5 = 32.$

Скорость реки, м/с $v_1 = 2,8; v_2 = 2,6; v_3 = 2,6; v_4 = 2,5; v_5 = 2,5.$

Углы поворота реки $\alpha_1 = 120^\circ; \alpha_2 = 142^\circ; \alpha_3 = 164^\circ.$

$k = 14 \text{ м}; C_1 = 0,13; n = 27; q = 1,2 \text{ м}^3/\text{с}.$

В сточных водах химического предприятия содержатся следующие органические и неорганические загрязняющие вещества: метанол, ацетон, толуол, ртуть (Hg), мышьяк (As) и твердые взвешенные частицы; в сточных водах лакокрасочного завода – ацетон, керосин и толуол. Предельно допустимые концентрации химических загрязняющих веществ: $\text{ПДК}_{\text{метанол}} = 3 \text{ мг/л}$, $\text{ПДК}_{\text{ацетон}} = 0,3 \text{ мг/л}$, $\text{ПДК}_{\text{толуол}} = 0,5 \text{ мг/л}$, $\text{ПДК}_{\text{керосин}} = 0,1 \text{ мг/л}$, $\text{ПДК}_{\text{Hg}} = 0,005 \text{ мг/л}$. $\text{ПДK}_{\text{As}} = 0,05 \text{ мг/л}$. Допустимая концентрация твердых взвешенных частиц в воде, используемой для культурно-бытовых целей $C_{\text{доп}} = 0,75 \text{ мг/л}$, для хозяйственно-питьевого водоснабжения $C_{\text{доп}} = 0,25 \text{ мг/л}$.

Допустимое биологическое потребление кислорода в воде, используемой для культурно-бытовых целей $C_{\text{бпк}} = 6 \text{ мг/л}$, для хозяйственно-питьевого водоснабжения $C_{\text{бпк}} = 3 \text{ мг/л}$.

Содержание загрязняющих веществ в сбросе лакокрасочного завода, мг/л: толуол – 1; ацетон – 6; керосин – 7.

Содержание загрязняющих веществ в сбросе химического завода, мг/л: толуол – 8; ацетон – 12; метанол – 15; ртуть – 4; мышьяк – 2; твердые частицы – 19.

Концентрация загрязняющих веществ в реке до сброса, мг/л: толуол – 0; ацетон – 0,02; метанол – 0,95; ртуть – 0,0009; мышьяк – 0; твердые частицы – 0,08.

Решение

1. Для участка АВ:

$$D_c = \frac{v_{\text{ср}} \cdot H_{\text{ср}}}{200},$$

где $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость течения водотока на интересующем нас участке между нулевым и расчетным створами, м/с; $H_{\text{ср}}$ – средняя глубина на этом участке, м.

$$v_{cp} = (2,8 + 2,6) / 2 = 2,7 \text{ м/с}$$

$$H_{cp} = (6,5 + 6,1) / 2 = 6,3 \text{ м}$$

$$D_c = \frac{v_{cp} \cdot H_{cp}}{200} = 2,7 \times 6,3 / 200 = 0,085$$

$$L_{ab} (\text{по прямой}) = \sqrt{(L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2 \times \cos \alpha_1)} = \\ = (6^2 + 3^2 - 2 \times 6 \times 3 \times \cos(120^\circ))^{0,5} = 7,9 \text{ км}$$

$$\psi = (6 + 3) / 7,9 = 1,14$$

$$k = \varphi \times \psi \times \sqrt[3]{D_1/V_{cz}} = 1,0 \times 1,14 \times (0,085 / 1,2)^{1/3} = 0,47$$

$$\sqrt[3]{L} = \sqrt[3]{6000 + 3000} = 20,8$$

Количество воды (в м), протекающее через данное живое сечение реки в секунду, называют *расходом реки* (для данного пункта). Теоретически расход (v_{cb}) вычислить просто: он равен площади живого сечения реки (F), умноженной на среднюю скорость течения (v), т. е. $v_{cb} = Fv$.

$$v_b = (6,5 \times 28 \times 2,8 + 6,1 \times 30 \times 2,6) / 2 = 492,7 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$m_c = \frac{1 - \exp(-k \times \sqrt[3]{L})}{1 + \left(\frac{v_z}{v_{cz}}\right) \times \exp(-k \times \sqrt[3]{L})} = (1 - \exp(-0,47 \times 20,8)) / \\ / (1 + (492,7 / 1,2) \times \exp(-0,47 \times 20,8)) = 0,95$$

Кратность разбавления n_p сточных вод и концентрация вредных веществ через 9 м (от А до В):

$$n = n_p = 1 + m_c V_b / V_{cb} = 1 + 0,95 \times 492,7 / 1,2 = 399;$$

$$c_{\text{толуол}} = 0 + (11 + 8 - 0) / 399 = 0,048 \text{ мг/л} < 0,5 \text{ мг/л}$$

$$c_{\text{ацетон}} = 0,02 + (6 + 12 - 0,02) / 399 = 0,065 \text{ мг/л} < 0,3 \text{ мг/л}$$

$$c_{\text{керосин}} = 0,019 + (7 - 0,019) / 399 = 0,036 \text{ мг/л} < 0,1 \text{ мг/л}$$

$$c_{\text{метанол}} = 0,95 + (15 - 0,95) / 399 = 0,99 \text{ мг/л} < 3 \text{ мг/л}$$

$$c_{\text{Hg}} = 0,0009 + (4 - 0,0009) / 399 = 0,0109 \text{ мг/л} > 0,005 \text{ мг/л}$$

$$c_{As} = 0 + (2 - 0) / 399 = 0,005 \text{ мг/л} < 0,05 \text{ мг/л}$$

$$c_{\text{тв. част.}} = 0,08 + (19 - 0,08) / 399 = 0,13 \text{ мг/л} < 0,75 \text{ мг/л}$$

Коэффициент загрязнения органическими веществами $C = 0,048 / 0,5 + 0,065 / 0,3 + 0,036 / 0,1 + 0,99 / 3 + 0,0109 / 0,005 + 0,005 / 0,05 = 3,3 > 1,3$

Вывод: хотя в точке В концентрации практически всех загрязняющих веществ ниже ПДК (кроме ртути) и коэффициент разбавления ($n = 399$) значительно выше минимального коэффициента разбавления, при котором восстанавливаются органолептические свойства воды = 27, вода не годится для культурно-бытовых целей, т. к. коэффициент загрязнения органическими веществами ($C = 3,3$) значительно выше коэффициента допустимого загрязнения органическими веществами = 1,3.

2. Для участка АС:

$$D_c = \frac{v_{cp} \cdot H_{cp}}{200},$$

где v_{cp} – средняя скорость течения водотока на интересующем нас участке между нулевым и расчетным створами, м/с; H_{cp} – средняя глубина на этом участке, м.

$$v_{cp} = (2,8 + 2,6 + 2,6 + 2,5 + 2,5) / 5 = 2,6 \text{ м/с}$$

$$H_{cp} = (6,5 + 6,1 + 6,1 + 6,4 + 6,8) / 5 = 6,38 \text{ м}$$

$$D_c = \frac{v_{cp} \cdot H_{cp}}{200}, = 2,6 \times 6,38 / 200 = 0,08$$

$$L_{ac} \text{ (по прямой)} = \sqrt{(L_1^2 + (L_2 + L_3)^2 - 2L_1(L_2 + L_3) \times \cos \alpha_1)} + \sqrt{(L_4^2 + L_5^2 - 2L_4L_5 \times \cos \alpha_3)} = (6^2 + (3 + 6)^2 - 2 \times 6 \times (3 + 6) \times \cos(120^\circ))^{0,5} + (7^2 + 8^2 - 2 \times 7 \times 8 \times \cos(164^\circ))^{0,5} = 13,08 + 14,85 = 27,9 \text{ км}$$

$$\psi = (6 + 3 + 6 + 7 + 8) / 27,9 = 1,07$$

Количество воды (в м), протекающее через данное живое сечение реки в секунду, называют *расходом реки* (для данного пункта). Теоретически расход (v_{cb}) вычислить просто: он равен площади живого сечения реки (F), умноженной на среднюю скорость течения (v), т. е. $v_{cb} = Fv$.

$$V_B = (6,5 \times 28 \times 2,8 + 6,1 \times 30 \times 2,6 + 6,1 \times 30 \times 2,6 + 6,4 \times 32 \times 2,5 + 6,8 \times 32 \times 2,5) / 5 = 503,4 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$k = \varphi \times \psi \times \sqrt[3]{D_1/V_{cz}} = 1,0 \times 1,07 \times (0,08 / 1,2)^{1/3} = 0,43$$

$$\sqrt[3]{L} = \sqrt[3]{6000 + 3000 + 6000 + 7000 + 8000} = 31,1$$

$$m_c = \frac{1 - \exp(-k \times \sqrt[3]{L})}{1 + \left(\frac{V_z}{V_{cz}}\right) \times \exp(-k \times \sqrt[3]{L})} = (1 - \exp(-0,43 \times 31,1)) / \\ / (1 + ((503,4 / 1,2) \times \exp(-0,43 \times 31,1))) = 1,0$$

Кратность разбавления n_p сточных вод и концентрация вредных веществ через 30 м (от А до С):

$$\begin{aligned} n &= n_p = 1 + m_c V_v / V_{cv} = 1 + 1,0 \times 503,7 / 1,2 = 420; \\ c_{\text{толуол}} &= 0 + (11 + 8 - 0) / 420 = 0,045 \text{ мг/л} < 0,5 \text{ мг/л} \\ c_{\text{ацетон}} &= 0,02 + (6 + 12 - 0,02) / 420 = 0,063 \text{ мг/л} < 0,3 \text{ мг/л} \\ c_{\text{керосин}} &= 0,019 + (7 - 0,019) / 420 = 0,036 \text{ мг/л} < 0,1 \text{ мг/л} \\ c_{\text{метанол}} &= 0,95 + (15 - 0,95) / 420 = 0,98 \text{ мг/л} < 3 \text{ мг/л} \\ c_{\text{Hg}} &= 0,0009 + (4 - 0,0009) / 420 = 0,0104 \text{ мг/л} > 0,005 \text{ мг/л} \\ c_{\text{As}} &= 0 + (2 - 0) / 420 = 0,005 \text{ мг/л} > 0,05 \text{ мг/л} \\ c_{\text{тв. част.}} &= 0,08 + (19 - 0,08) / 420 = 0,125 \text{ мг/л} < 0,25 \text{ мг/л} \end{aligned}$$

Коэффициент загрязнения органическими веществами $C = 0,045 / 0,5 + 0,063 / 0,3 + 0,036 / 0,1 + 0,98 / 3 + 0,0104 / 0,005 + 0,005 / 0,05 = 3,2 > 1,3$

Вывод: хотя в точке С концентрации практически всех загрязняющих веществ ниже ПДК (кроме ртути) и коэффициент разбавления ($n = 420$) значительно выше минимального коэффициента разбавления, при котором восстанавливаются органолептические свойства воды = 27, вода не годится для хозяйственно-питьевых целей, т. к. коэффициент загрязнения органическими веществами ($C = 3,2$) значительно выше коэффициента допустимого загрязнения органическими веществами = 1,3.

ВОПРОСЫ

1. Какие категории водопользования различают?
2. Какой процесс способствует уменьшению концентрации загрязнителя после сброса сточных вод в водоем?
3. Каков физический смысл коэффициента загрязнения органическими веществами?

ЛИТЕРАТУРА

1. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды. – М.: Экономика, 1985. – 120 с.

2. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.

3. Математические модели контроля загрязнения воды / под ред. А. Джеймса. – М.: Мир, 1981. – 472 с.

4. Немтинов, В. А. Информационный анализ и моделирование объектов природно-промышленной системы / В. А. Немтинов. – М.: «Издательство Машиностроение», 2005. – 112 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ГАЗООБРАЗНЫМИ ВЫБРОСАМИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В производственном процессе используется растворитель. Загрязненный воздух проходит предварительную очистку и выбрасывается в атмосферу через общую трубу. Труба установлена снаружи здания.

Выбрав соответствующие варианту исходные данные, необходимо:

- определить максимальную концентрацию паров растворителя в приземном слое атмосферы;
- определить опасную скорость ветра, при которой концентрация паров растворителя в приземном слое будет максимальной;
- рассчитать риск возникновения немедленных токсических эффектов и риск возникновения хронических заболеваний для населения, проживающего вблизи предприятия;
- дать рекомендации по уменьшению экологического риска для населения.

Данные для решения задачи приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Варианты заданий

Вариант	Тип растворителя	ПДК _{м.р.} , мг/м ³	ПДК _{с.с.} , мг/м ³	Класс опасности	Масса выбрасываемого растворителя, (М) мг/с	Высота трубы, (Н _{тр}) м	Диаметр устья трубы (D) мм	Вертикальная составляющая скорости выброса из трубы (w _т), м/с	Высота здания (Н _{зд}), м	Длина здания (L _{зд}), м
1	Ацетатный	0,5	0,1	3	120	15,0	250	10	10	30
2	Бутилформатный	0,3	0,1	3	100	15,0	300	12	12	36
3	Ацетон-эфирный	0,12	0,04	4	50	16,0	200	11	10	50
4	Эфирноацетоновый	0,07	0,02	4	12	17,0	200	9	12	36
5	Мебельный (по толуолу)	0,09	0,02	3	50	18,0	250	12	12	60

Вариант	Тип растворителя	ПДК _{м.р.} , мг/м ³	ПДК _{с.с.} , мг/м ³	Класс опасности	Масса выбрасываемого растворителя, (М) мг/с	Высота трубы, (Н _р) м	Диаметр устья трубы (Д) мм	Вертикальная составляющая скорости выброса из трубы (w _п), м/с	Высота здания (Н _{зд}), м	Длина здания (L _{зд}), м
6	Бутилформиатный	0,3	0,1	3	150	19,0	300	10	15	75
7	Ацетатный	0,5	0,1	3	300	22,0	250	11	15	80
8	Эфирноацетоновый	0,07	0,02	4	50	17,5	200	10	10	90
9	Бутилформиатный	0,3	0,1	3	105	18,0	250	9	12	60
10	Мебельный (по толуолу)	0,09	0,02	3	48	16,0	300	12	12	60
11	Ацетатный	0,5	0,1	3	95	19,0	220	9	15	46
12	Бутилформиатный	0,3	0,1	3	80	15,0	300	11	12	37
13	Ацетоноэфирный	0,12	0,04	4	40	18,0	300	11	12	48
14	Эфирноацетоновый	0,07	0,02	4	25	16,0	330	12	11	33
15	Мебельный (по толуолу)	0,09	0,02	3	65	16,0	300	10	10	70
16	Бутилформиатный	0,3	0,1	3	95	16,5	200	10	11	55
17	Ацетатный	0,5	0,1	3	280	21,0	250	9	12	72
18	Эфирноацетоновый	0,07	0,02	4	20	15,0	300	12	10	30
19	Бутилформиатный	0,3	0,1	3	110	18,0	250	10	12	48
20	Мебельный (по толуолу)	0,09	0,02	3	35	19,0	320	12	15	45

Методические указания

Рассеивание выбросов в атмосфере

Согласно ОНД-90 «Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» [11], в зависимости от расположения и организации выбросов, источники загрязнения атмосферы подразделяются на: затененные, незатененные, линейные, точечные.

Точечные источники загрязнения сконцентрированы в одном месте (выбросные трубы).

Линейные источники загрязнения имеют значительную протяженность в направлении, перпендикулярном ветру (аэрационные фанари, открытые окна). *Незатененные источники загрязнения* – высокие трубы, расположенные в недеформированном потоке ветра, выбросы загрязняющих веществ удаляются на высоту $H_{\text{тр}} > 2,5 H_{\text{зд}}$.

Затененные источники загрязнения – выбросы удаляются на высоту $H_{\text{тр}} \leq 2,5 H_{\text{зд}}$ и попадают в аэродинамическую зону ($H_{\text{тр}}$ – высота трубы, $H_{\text{зд}}$ – высота здания).

Затененные источники выброса

1. Максимальная концентрация вредных веществ в приземном слое на заводской площадке при выбросе загрязняющих веществ через низкие трубы находится по формуле

$$C_m = \frac{0,530 \cdot M \cdot \varphi \cdot E \cdot k_{aT}}{D \cdot w_r \cdot H_{\text{зд}}}, [мг / м^3] \quad (9)$$

где M – масса вредного выбрасываемого вещества в атмосферу в единицу времени мг/с; φ – коэффициент скорости, учитывающий поле скоростей над зданием (табл. 2); k_{aT} – коэффициент, учитывающий максимальное изменение концентраций в зависимости от отношения длины здания ($L_{\text{зд}}$) к высоте здания ($H_{\text{зд}}$), (табл. 3); E – безразмерный коэффициент, зависящий от относительного коэффициента $\bar{h}$ (табл. 2); D – диаметр устья трубы, м; w_r – вертикальная составляющая скорости выброса загрязненного воздуха из трубы, м/с; $\bar{h}$ – относительный коэффициент:

$$\bar{h} = \frac{H_{\text{мп}} - H_{\text{зд}}}{H_{\text{зд}}} \quad (10)$$

Таблица 2 – Зависимость коэффициента φ и E от $\bar{h}$

$\bar{h}$	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,2
φ	0,8	1,0	1,1	1,2	1,4	1,4
E	1,11	0,83	0,59	0,4	0,26	0,18

Таблица 3 – Зависимость коэффициента k_{aT} от $L_{\text{зд}}$ и $H_{\text{зд}}$.

$L_{\text{зд}}/H_{\text{зд}}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_{aT}	1,2	1,3	1,15	1,0	0,8	0,65	0,5	0,35	0,28	0,23

2. Опасная скорость ветра при затененных источниках выброса (v_m), м/с:

$$v_m = 1,5 \cdot \varphi \cdot \sqrt[3]{\frac{Q}{H_{зд.}}}, \text{ м/с} \quad (11)$$

где Q – объем газо-воздушной смеси, выбрасываемой из труб, м³/с.

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot w_r, \text{ м}^3/\text{с} \quad (12)$$

3. Оценка риска здоровья населения при загрязнении атмосферы. Рекомендации по уменьшению риска.

1. Оценка риска возникновения немедленных токсических эффектов проводится по методике, описанной в [4].

Вероятность токсического воздействия вредного вещества на человека (*Prob*) в соответствии с классом опасности определяется по следующим уравнениям:

1-й класс $Prob = -9,15 + 11,66 \lg(C/\text{ПДК}_{\text{м.р}})$ (13)

2-й класс $Prob = -5,51 + 7,49 \lg(C/\text{ПДК}_{\text{м.р}})$ (14)

3-й класс $Prob = -2,35 + 3,73 \lg(C/\text{ПДК}_{\text{м.р}})$ (15)

4-й класс $Prob = -1,41 + 2,33 \lg(C/\text{ПДК}_{\text{м.р}})$ (16)

где C – средняя концентрация вещества в атмосферном воздухе населенных мест за оценочный период, мг/м³.

Перевод *Prob* в *Risk* осуществляется по табл. 7.

Таблица 7 – Таблица нормального вероятностного распределения

<i>Prob</i>	<i>Risk</i>	<i>Prob</i>	<i>Risk</i>	<i>Prob</i>	<i>Risk</i>	<i>Prob</i>	<i>Risk</i>
-3,0	0,001	-1,1	0,136	0,0	0,50	1,1	0,864
-2,5	0,006	-1,0	0,157	0,1	0,540	1,2	0,885
-2,0	0,023	-0,9	0,184	0,2	0,579	1,3	0,903
-1,9	0,029	-0,8	0,212	0,3	0,618	1,4	0,919
-1,8	0,036	-0,7	0,242	0,4	0,655	1,5	0,933
-1,7	0,045	-0,6	0,274	0,5	0,692	1,6	0,945
-1,6	0,055	-0,5	0,309	0,6	0,726	1,7	0,955
-1,5	0,067	-0,4	0,345	0,7	0,758	1,8	0,964
-1,4	0,081	-0,3	0,382	0,8	0,788	1,9	0,971
-1,3	0,097	-0,2	0,421	0,9	0,816	2,0	0,977
-1,2	0,115	-0,1	0,460	1,0	0,841	2,5	0,994
						3,0	0,999

Для расчета эффектов, связанных с длительным (хроническим) воздействием вредных веществ, используется информация об их среднегодовых концентрациях.

Среднегодовые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе рассчитываются по данным «Ежегодников о состоянии загрязнения воздуха городов и промышленных центров» за несколько лет, но не менее чем за два года.

В случае отсутствия данных о среднегодовых концентрациях согласно методике, описанной в литературе [10], обычно принимают значение среднегодовой концентрации на один порядок меньше максимальной разовой.

$$C_r = 0,1 \times C_{м.р.} \quad (17)$$

Согласно методике, приведенной в литературе [10], для расчета вероятного времени наступления токсических эффектов можно воспользоваться уравнением, основанном на принятой в СНГ системе регламентирования химических веществ в воздухе населенных мест:

$$\lg T = \lg T_0 + \lg \left(\frac{C}{ПДК_r} \right)^b, \quad (18)$$

где T – вероятное время наступления токсического эффекта; T_0 – расчетное время гарантированного ($p < 0,05$) отсутствия токсического эффекта, на которое разрабатывается норматив (25 лет); $ПДК_r = 0,2 \times \times ПДК_{с.с.}$ – гигиенический регламент; b – коэффициент изоэффективности, учитывающий особенности токсических свойств вещества (определяется в соответствии с классом опасности вещества).

Рекомендуемые значения коэффициента b на расчетный срок (25 лет), в зависимости от класса опасности, позволяет предложить следующие его значения для использования в уравнении (18): 1 класс – 2,40; 2 класс – 1,31; 3 класс – 1,00; 4 класс – 0,86.

Независимо от класса опасности **при концентрации меньше ПДК**, коэффициент **$b = 1,00$** .

Пример решения задачи

Задача

В производственном процессе используется растворитель. Загрязненный воздух проходит предварительную очистку и выбрасывается в атмосферу через общую трубу. Труба установлена снаружи здания.

Дано:

1. Тип растворителя – мебельный (по толуолу);
2. ПДК_{м.р.} – 0,09 мг/м³;
3. ПДК_{с.с.} – 0,02 мг/м³;
4. Класс опасности растворителя – 3-й;
5. Масса выбрасываемого растворителя (М) – 30 мг/с;
6. Высота трубы (H_{тр}) – 23,0 м;
7. Диаметр устья трубы (Д) – 200 мм;
8. Вертикальная составляющая скорости выброса паров растворителя из устья трубы – 12 м/с;
9. Высота здания (H_{зд.}) – 15 м;
10. Длина здания (L) – 45 м.

Требуется определить:

1. Максимальную концентрацию паров растворителя в приземном слое атмосферы (C_м).
2. Опасную скорость ветра (V_м), при которой концентрация паров растворителя в приземном слое будет максимальной.
3. Риск возникновения немедленных токсических эффектов и риск возникновения хронических заболеваний для населения, проживающего вблизи предприятия.
4. Дать рекомендации по уменьшению экологического риска для населения.

Решение

По условию задачи выбросы из источника загрязнения можно отнести к **затененным** (выбросы удаляются на высоту $H_{тр} \leq 2,5H_{зд}$ и попадают в аэродинамическую зону).

1. Максимальная концентрация вредных веществ в приземном слое на заводской площадке при выбросе загрязняющих веществ через низкие трубы находится по формуле

$$C_m = \frac{0,530 \cdot M \cdot \varphi \cdot E \cdot k_{\alpha T}}{D \cdot w_r \cdot H_{зд.}}, [мг / м^3]$$

$\bar{h}$ – относительный коэффициент, который можно рассчитать по зависимости:

$$\bar{h} = \frac{H_{мр.} - H_{зд.}}{H_{зд.}} = \frac{23 - 15}{15} \approx 0,5$$

$$C_m = \frac{0,530 \cdot 30 \cdot 1,1 \cdot 0,59 \cdot 1,15}{0,2 \cdot 12 \cdot 15} = 0,329_{мг} / м^3$$

2. Опасная скорость ветра при затененных источниках выброса (v_m) определяется по формулам

$$v_m = 1,5 \cdot \varphi \cdot \sqrt[3]{\frac{Q}{H_{зд.}}} = 1,5 \cdot 1,1 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,38}{15}} \approx 0,5 \cdot \text{м} / \text{с}$$

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot w_r = \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} \cdot 12 = 0,38, \text{м}^3 / \text{с}$$

3. Оценка риска возникновения немедленных токсических эффектов.

Вероятность токсического воздействия вещества 3 класса опасности определяется по уравнению:

$$Prob = -2,35 + 3,73 \lg(C/\text{ПДК}_{м,р})$$

$$Prob = -2,35 + 3,73 \lg(0,329 / 0,09) = -0,25$$

Перевод *Prob* в *Risk* может быть осуществлен по табл. 7.

Т. к. в таблице нет искомого значения *Prob*, применим метод интерполяции ближайшие значения *Prob* $-0,2$ и $-0,3$ для них *Risk* = $0,421$ и $0,382$ соответственно. Следовательно, значение искомого риска составит

$$Risk = 0,382 - \frac{0,421 - 0,382}{-0,2 - (-0,3)} \cdot (-0,25 - (-0,3)) = 0,402$$

Для расчета вероятного времени наступления токсических эффектов от накопленной суммарной дозы при оценке кратности превышения ПДК_r воспользуемся уравнением:

$$\lg T = \lg T_0 - \lg \left(\frac{C_z}{\text{ПДК}_r} \right)^b,$$

$$\lg T = \lg 25 - \lg (0,0329 / 0,004)^{1,0} = 1,40 - 0,92 = 0,48,$$

$$T = 10^{0,48} \approx 3 \text{ года},$$

где T – вероятное время наступления токсического эффекта; T_0 = 25 лет – расчетное время гарантированного ($p < 0,05$) отсутствия токсического эффекта, на которое разрабатывается норматив; C_z – осредненная концентрация вещества в атмосферном воздухе населенных мест за оцениваемый период принимается равной $C_z = 0,1 C_m$ ($C_z = 0,1 \times \times 0,329 = 0,0329 \text{ мг/м}^3$); $\text{ПДК}_r = 0,2 \times \text{ПДК}_{с.с.} = 0,2 \times 0,02 = 0,004 \text{ мг/м}^3$ – гигиенический регламент; $b = 1,0$ – коэффициент изодозности для веществ 3 класса опасности.

4. В рассматриваемой ситуации экологический риск неоправданно высок, так как у населения присутствует риск возникновения немедленных токсических эффектов и время наступления хронического токсического эффекта значительно меньше 25 лет. Необходимо принять меры по улучшению экологической ситуации.

Рекомендации: установить дополнительную систему очистки; модернизировать производство с тем, чтобы уменьшить массу выбрасываемого вещества, Все эти мероприятия потребуют достаточно больших инвестиций в производство, однако в данном случае приоритетным является здоровье населения.

ВОПРОСЫ

1. На какие виды подразделяются источники загрязнения атмосферы?

2. Какие источники загрязнения атмосферы относятся к точечным? Линейным? Затененным? Незатененным?

3. Чему равно расчетное время гарантированного ($p < 0,05$) отсутствия токсического эффекта, на которое разрабатывается норматив?

ЛИТЕРАТУРА

1. Алымов, В. Т., Крапчатов, В. П., Тарасова, Н. П. Анализ техногенного риска: учеб. пособие для студентов вузов / В. Т. Алымов, В. П. Крапчатов, Н. П. Тарасова. – М.: Круглый год, 2000. – 160 с.

2. Марфенин, Н. Н. Устойчивое развитие человечества: Классический университетский учебник / Н. Н. Марфенин. – М.: Изд-во МГУ, 2006. – 624 с.

3. Коробкин, В. И. Экология / В. И. Коробкин. – изд. 7-е. – Р. н/Д: изд-во «Феникс», 2004. – 576 с.

4. Бобков, А. С. Охрана труда и экологическая безопасность в химической промышленности: учебник для вузов / А. С. Бобков. – М.: Химия, 1997. – 400 с.

5. Белов, С. В., Ильницкая, А. В., Козьяков, А. Ф. Безопасность жизнедеятельности: учебник для вузов / С. В. Белов, А. В. Ильницкая, А. Ф. Козьяков. – 4-е изд. – Минск: Высш. шк., 2004. – 606 с.

6. Зайцев, В. А. Промышленная экология: учеб. пособие / РХТУ им. Д.И. Менделеева. – М., 1998. – 140 с.

7. РД-09-536-03 Методические указания о порядке разработки плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС) на хи-

мико-технологических объектах. <http://www.nirhtu.ru/> факультет «Кибернетика», кафедра «УР и БЖД»→ нормативные документы.

8. Маринина, Л. К., Васин, А. Я., Торопов, Н. И. Безопасность труда в химической промышленности: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. Л. К. Маринина, А. Я. Васин, Н. И. Торопов. – 2-е изд. – М.: Академия, 2007. – 528 с.

9. Воробьев, А. В. Основы природопользования: экологические, экономические и правовые аспекты: учебное пособи /под редакцией Дьяченко В. В. – изд. 2-е – Р. н/Д: Феникс (Высшее образование), 2007. – 542 с.

10. Киселёв, А. В., Фридман, К. Б. Оценка риска здоровью / А. В. Киселёв, К. Б. Фридман. – СПб., 1997. – 235 с.

11. РД 52.04.253-90 Определение размеров зон заражения при авариях на ХОО и транспорте.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ АВАРИЯХ НА ХИМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Определить размеры зон заражения при аварии на химически опасном объекте, приведшей к разгерметизации емкости с активным химически опасным веществом (АХОВ) и возможные потери среди населения, оказавшегося в зоне заражения. В результате разгерметизации всё содержимое емкости свободно вылилось на подстилающую поверхность.

Заданы: тип и количество вылившегося АХОВ, метеоусловия на момент аварии, расстояние от места аварии до поселения, протяженность поселения по направлению ветра. Ветер направлен в сторону поселения.

Требуется определить:

1. Глубину зоны заражения через 2 часа после аварии.
2. Продолжительность поражающего действия АХОВ.
3. Время подхода АХОВ к поселению, время полного заражения поселения.
4. Площадь зоны возможного заражения и площадь зоны фактического заражения.
5. Вид зоны возможного заражения.
6. Возможные потери людей.

Таблица 1 – Варианты задачи

№ варианта	АХОВ (аварийно-химически опасное вещество)	Количество разлившегося при аварии вещества, Q_0 , т	Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	Скорость ветра, V , м/с	Вертикальная устойчивость воздуха	Расстояние от места аварии до поселения, X , м	Протяженность поселения по оси ветра, X^1 , м
1	Аммиак (изо-термическое хранение)	40	20	1	инверсия	2000	1000
2	Хлор	93	0	2	изотермия	3000	1500

Продолжение табл. 1

№ варианта	АХОВ (аварийно-химически опасное вещество)	Количество разлившегося при аварии вещества, Q_0 , т	Температура воздуха, t_0 , °C	Скорость ветра, V , м/с	Вертикальная устойчивость воздуха	Расстояние от места аварии до поселения, X , м	Протяженность поселения по оси ветра, X^1 , м
3	Метил меркаптан	52	20	3	инверсия	2500	1800
4	Формальдегид	48	20	4	изотермия	1500	2000
5	Сернистый ангидрид	86	0	1	инверсия	2000	1000
6	Сероводород	57	–20	2	изотермия	2500	1500
7	Хлорциан	73	20	3	инверсия	3000	1800
8	Триметиламин	40	20	4	изотермия	1500	2500
9	Формальдегид	46	0	1	инверсия	2000	2000
10	Фосген	87	20	2	изотермия	3000	1600
11	Метил хлористый	58	–20	3	инверсия	2500	1800
12	Хлор	90	–20	4	изотермия	1500	1000
13	Метиламин	41	20	1	инверсия	2000	1500
14	Хлорциан	73	20	2	изотермия	2500	1800
15	Диметиламин	40	20	3	инверсия	3000	2000
16	Аммиак (изотермическое хранение)	40	0	4	изотермия	1500	1000
17	Хлор	90	–20	1	инверсия	2000	1500
18	Метил меркаптан	50	20	2	изотермия	3000	1800
19	Формальдегид	45	0	3	инверсия	2500	2500
20	Сернистый ангидрид	80	20	4	изотермия	1500	2000

Методические указания

Определение размеров зон заражения при авариях на ХОО и транспорте [11].

Общие положения

Методика распространяется на случай выброса АХОВ в атмосферу в газообразном, парообразном или аэрозольном состоянии.

Масштабы заражения АХОВ в зависимости от их физических свойств и агрегатного состояния рассчитываются по первичному и вторичному облаку, например:

- для сжиженных газов – отдельно по первичному и вторичному облаку;

- для сжатых газов – только по первичному облаку;

- для ядовитых жидкостей, с температурой кипения выше температуры окружающей среды – только по вторичному облаку.

Ёмкости, содержащие АХОВ, при авариях разрушаются полностью.

Толщина слоя жидкости АХОВ (h), разлившейся **свободно** на подстилающую поверхность, принимается $h = 0,05$ м по всей площади разлива.

АХОВ – это химическое вещество, применяемое в народнохозяйственных целях, которое при выливе или выбросе может приводить к заражению воздуха с поражающими концентрациями.

Зона заражения АХОВ – территория, заражённая АХОВ в опасных для жизни людей пределах.

Под прогнозированием масштаба заражения АХОВ понимается определение глубины и площади зоны заражения АХОВ.

Под аварией понимается нарушение технологических процессов на производстве, повреждение трубопроводов, ёмкостей, хранилищ, транспортных средств при осуществлении перевозок и т.п., приводящие к выбросу АХОВ в атмосферу в количествах, представляющих опасность массового поражения людей и животных.

Под разрушением химически опасного объекта следует понимать его состояние в результате катастроф и стихийных бедствий, приведших к полной разгерметизации всех ёмкостей и нарушению технологических коммуникаций.

Химически опасный объект народного хозяйства – объект, при аварии которого или разрушении которого могут произойти массовые поражения людей, животных и растений АХОВ.

Первичное облако – облако АХОВ, образующееся в результате мгновенного (1–3 мин.) перехода в атмосферу части содержимого ёмкости АХОВ при её разрушении.

Вторичное облако – облако АХОВ, образующееся в результате испарения разлившегося вещества с подстилающей поверхности.

Пороговая токсодоза – ингаляционная токсодоза, вызывающая начальные симптомы поражения.

Под эквивалентным количеством АХОВ понимается такое количество хлора, масштаб заражения которым при инверсии эквивалентен масштабу заражения при данной степени вертикальной устойчивости воздуха количеством данного вещества, перешедшим в первичное (вторичное) облако.

Площадь зоны фактического заражения АХОВ – площадь территории, заражённой АХОВ в опасных для жизни концентрациях.

Площадь зоны возможного заражения АХОВ – площадь территории, в пределах которой под воздействием направления ветра может перемещаться облако АХОВ.

Прогнозирование глубины зон заражения АХОВ

Расчёт глубин зоны заражения АХОВ ведётся с помощью данных, приведённых в табл. 3, 5–7.

Значение глубины зоны заражения при аварийном выбросе (разливе) АХОВ определяется по табл. 5 и 6 в зависимости от количественных характеристик выброса и скорости ветра.

Определение количественных характеристик выброса АХОВ

Количественные характеристики выброса АХОВ для расчёта масштабов заражения определяются по их эквивалентным значениям.

Эквивалентное количество вещества по первичному облаку (тонны) определяется по формуле:

$$Q_{\text{Э1}} = K_1 \times K_3 \times K_5 \times K_7 \times Q_0, \quad (19)$$

где Q_0 – количество выброшенного (разлившегося) при аварии вещества, т; K_1 – коэффициент, зависящий от условий хранения АХОВ, (табл. 6); K_3 – коэффициент, равный отношению пороговой токсодозы хлора к пороговой токсодозе другого АХОВ (табл. 6); K_5 – коэффициент, учитывающий степень вертикальной устойчивости воздуха, принимается равным для инверсии 1, для изотермии 0,23; K_7 – коэффициент, учитывающий влияние t воздуха (табл. 6).

Определение эквивалентного количества вещества по вторичному облаку.

Эквивалентное количество вещества по вторичному облаку (в тоннах) рассчитывается по формуле

$$Q_{э_2} = (1 - K_1) K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 \frac{Q_0}{h \cdot d}, \quad (20)$$

где K_2 – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств АХОВ (табл. 6); K_4 – коэффициент, учитывающий скорость ветра (табл. 7); K_6 – коэффициент, зависящий от времени, прошедшего после начала аварии N .

Значение коэффициента K_6 определяется после расчёта продолжительности испарения вещества T формула (26):

$$K_6 = N^{0,8} \text{ при } N < T;$$

$$K_6 = T^{0,8} \text{ при } N > T;$$

$$K_6 = 1 \text{ при } T < 1 \text{ часа,}$$

где N – время, на которое определяется прогноз; T – время испарения АХОВ; d – плотность АХОВ, т/м³ (табл. 6); h – толщина слоя АХОВ, м.

Расчёт глубины зоны заражения при аварии на химически опасном объекте

Расчёт глубины зон заражения первичным (вторичным) облаком АХОВ при авариях на технологических ёмкостях и железнодорожных цистернах ведётся с помощью табл. 5 и 6.

В табл. 5 приведены максимальные значения глубин зон заражения первичным Γ_1 или вторичным облаком Γ_2 , определяемые в зависимости от эквивалентного количества вещества (его расчёт проводится согласно п. 1.2.) и скорости ветра. Полная глубина зоны заражения Γ (км), обусловленная воздействием первичного и вторичного облака АХОВ, определяется по формуле

$$\Gamma = \Gamma^I + 0,5 \times \Gamma^{II}, \quad (21)$$

где Γ^I – максимальное значение из Γ_1 и Γ_2 , км; Γ^{II} – минимальное значение из Γ_1 и Γ_2 , км.

Полученное значение Γ сравнивается с предельно возможным значением глубины переноса воздушных масс Γ_n , определяемым по формуле

$$\Gamma_n = N \times v, \quad (22)$$

где N – время от начала аварии, ч; v – скорость переноса переднего фронта АХОВ при данных степени устойчивости воздуха и скорости ветра, км/ч (табл. 3).

За окончательную расчётную глубину зоны заражения принимается меньшее из 2-х сравниваемых между собой значений (Γ и Γ_n), определяемых по формулам 21 и 22.

Определение площади зоны заражения

Площадь зоны возможного заражения облаком АХОВ определяется по формуле

$$S_B = 8,72 \times 10^{-3} \times \Gamma^2 \times \varphi, \quad (23)$$

где S_B – площадь зоны возможного заражения, км²; Γ – глубина зоны возможного заражения, км; φ – угловые размеры зоны возможного заражения, град. (табл. 2).

Таблица 2 – Угловые размеры зоны возможного заражения АХОВ в зависимости от скорости ветра V

V , м/с	<0,5	0,6–1	1,1–2	>2
φ , град.	360	180	90	45

Площадь зоны фактического заражения S_ϕ в км² рассчитывается по формуле

$$S_\phi = K_8 \Gamma^2 N^{0,2}, \quad (24)$$

где K_8 – коэффициент, зависящий от степени вертикальной устойчивости воздуха, принимается равным: **0,081 – при инверсии, 0,133 – при изотермии**; N – время, прошедшее после начала аварии, ч.

Определение времени подхода облака АХОВ к поселению и продолжительности поражающего действия АХОВ

Время подхода облака АХОВ к заданному объекту зависит от скорости переноса облака воздушным потоком и определяется по формуле

$$t = X/v, \quad (25)$$

где X – расстояние от источника заражения до заданного объекта, км; v – скорость переноса переднего фронта облака АХОВ, км/ч (табл. 3).

Таблица 3 – Скорость переноса переднего фронта облака АХОВ в зависимости от скорости ветра

Скорость ветра, м/с	1	2	3	4	5	6
Скорость переноса, км/ч	инверсия					
	5	10	16	21		
	изотермия					
	6	12	18	24	29	35

Продолжительность поражающего действия АХОВ определяется временем его испарения с площади разлива.

Время испарения АХОВ с площади разлива (в часах) определяется по формуле

$$T = \frac{h \times d}{K_2 \times K_4 \times K_7}, \quad (26)$$

где h – толщина слоя АХОВ, м; d – удельная масса АХОВ, т/м³ (табл. 6); K_2 , K_4 , K_7 – коэффициенты (см. раздел «Прогнозирование глубины зон заражения АХОВ»).

Определение возможных потерь людей

Таблица 4 – Возможные потери рабочих, служащих и населения от АХОВ, %

Условия нахождения людей	Без противогазов	Обеспеченность противогазами, %									
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Открыто	90–100	75	65	58	50	40	35	25	18	10	
В простейших укрытиях, зданиях	50	40	35	30	27	22	18	18	9	4	

Примечание: структура потерь людей в очаге поражения: лёгкая степень – 25%, средняя степень – 40%, со смертельным исходом – 35%

Таблица 5 – Глубины зон возможного заражения АХОВ, км

Скорость ветра, м/с	Эквивалентное количество Q , АХОВ															
	0,01	0,05	0,1	0,5	1	3	5	10	20	30	50	70	100	300	500	1000
1	0,38	0,85	1,25	3,16	4,75	9,18	12,53	19,20	29,56	38,13	52,67	65,23	81,91	166	231	363
2	0,26	0,59	0,84	1,92	2,84	5,35	7,20	10,83	16,44	21,02	28,73	35,35	44,09	87,79	121	189
3	0,22	0,48	0,68	1,53	2,17	3,99	5,34	7,98	11,94	15,18	20,59	25,51	31,30	61,47	84,50	130
4	0,19	0,42	0,59	1,33	1,88	3,28	4,36	6,46	9,62	12,18	16,43	20,05	24,80	48,18	65,92	101
5	0,17	0,38	0,53	1,19	1,68	2,91	3,75	5,53	8,19	10,33	13,88	16,89	20,82	40,11	54,67	83,60
6	0,15	0,34	0,48	1,09	1,53	2,66	3,43	4,88	7,20	9,06	12,14	14,79	18,13	34,67	47,09	71,70

Таблица 6 – Характеристики АХОВ и вспомогательные коэффициенты для определения глубин зон заражения

Наименование АХОВ	Плотность АХОВ, т/м ³		t кипения, °С	Пороговая токсодоза, мг·мин/л	Значения вспомогательных коэффициентов									
	газ	ж-ть			К1	К2	К3	К7 (газ/жидкость)						
								для –40°С	для –20°С	для 0°С	для 20°С	для 40°С		
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Аммиак														
изотермическое хранение	–	0,681	–33,42	15	0,01	0,025	0,04	$\frac{0}{0,9}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$		
Водород мышья- ковистый	0,0035	1,64	–62,47	0,2**	0,17	0,054	0,857	$\frac{0,3}{1}$	$\frac{0,5}{1}$	$\frac{0,8}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,2}{1}$		
Диметиламин	0,0020	0,680	6,9	1,2*	0,06	0,041	0,5	$\frac{0}{0,1}$	$\frac{0}{0,3}$	$\frac{0}{0,8}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2,5}{1}$		
Метиламин	0,0014	0,699	–6,5	1,2*	0,13	0,034	0,5	$\frac{0}{0,3}$	$\frac{0}{0,7}$	$\frac{0,5}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2,5}{1}$		
Метил хлори- стый	0,0023	0,983	–23,76	10,8**	0,125	0,044	0,056	$\frac{0}{0,5}$	$\frac{0,1}{1}$	$\frac{0,6}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,5}{1}$		
Метилмеркаптан	–	0,867	5,95	1,7**	0,06	0,043	0,353	$\frac{0}{0,1}$	$\frac{0}{0,3}$	$\frac{0}{0,8}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2,4}{1}$		
Сернистый ан- гидрид	0,0029	1,462	–10,1	1,8	0,11	0,049	0,333	$\frac{0}{0,2}$	$\frac{0}{0,5}$	$\frac{0,3}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,7}{1}$		
Сероводород	0,0015	0,964	–60,35	16,1	0,27	0,042	0,36	$\frac{0,3}{1}$	$\frac{0,5}{1}$	$\frac{0,8}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,2}{1}$		
Триметиламин	–	0,671	2,9	6*	0,07	0,047	0,1	$\frac{0}{0,1}$	$\frac{0}{0,4}$	$\frac{0}{0,9}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2,2}{1}$		
Формальдегид	–	0,815	–19,0	0,6*	0,19	0,034	1,0	$\frac{0}{0,4}$	$\frac{0}{1}$	$\frac{0,5}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,5}{1}$		
Фосген	0,0035	1,432	8,2	0,6	0,05	0,061	1,0	$\frac{0}{0,1}$	$\frac{0}{0,3}$	$\frac{0}{0,7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2,7}{1}$		
Хлор	0,0032	1,553	–34,1	0,6	0,18	0,052	1,0	$\frac{0}{0,9}$	$\frac{0,3}{1}$	$\frac{0,6}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,4}{1}$		
Хлорциан	0,0021	1,220	12,6	0,75	0,04	0,048	0,80	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0,6}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{3,9}{1}$		

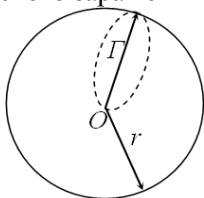
Примечание: в графах 10–14 в числителе значения K₇ – для первичного облака, в знаменателе – для вторичного.

Таблица 7 – Определение значения коэффициента K₄ в зависимости от скорости ветра

Скорость ветра, м/с	1	2	3	4	5	6
K ₄	1	1,33	1,67	2,0	2,34	2,67

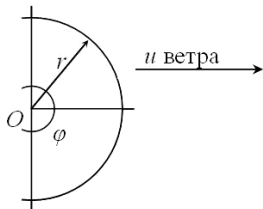
Порядок нанесения зон заражения на топографические карты и схемы

Зона возможного заражения облаком АХОВ на картах (схемах) ограничена окружностью, полуокружностью или сектором, имеющим угловые размеры φ и радиус r , равный глубине заражения Γ . Угловые размеры в зависимости от скорости ветра по прогнозу погоды приведены в разделе 3. Центр окружности, полуокружности или сектора совпадает с источником заражения. Зона фактического заражения, имеющая форму эллипса, находится в зону возможного заражения ввиду возможных перемещений облака АХОВ под воздействием изменений направления ветра. Фиксированное изображение зоны фактического заражения на карты (схемы) не наносится.



На топографических картах и схемах зона возможного заражения имеет вид:

а) при скорости ветра по прогнозу меньше 0,5 м/с зона заражения имеет вид окружности, т. **О** соответствует источнику заражения, $\varphi = 360^\circ$, радиус окружности равен Γ .



б) при скорости ветра по прогнозу от 0,6 до 1 м/с зона заражения имеет вид полуокружности, т. **О** соответствует источнику заражения, $\varphi = 180^\circ$, радиус окружности равен Γ . Биссектриса полуокружности совпадает с осью следа облака и ориентирована по направлению ветра.



в) при скорости ветра по прогнозу больше 1 м/с зона заражения имеет вид сектора, т. **О** соответствует источнику заражения, радиус равен Γ . Биссектриса сектора совпадает с осью следа облака и ориентирована по направлению ветра.

$\varphi = 90^\circ$ при скорости ветра по прогнозу от 1,1 до 2,0 м/с.

$\varphi = 45^\circ$ при скорости ветра по прогнозу больше 2,0 м/с.

Пример решения задачи

Задача

Определить размеры зон заражения при аварии на химически опасном объекте, приведшей к разгерметизации емкости с активным

химически опасным веществом (АХОВ) и возможные потери среди населения, оказавшегося в зоне заражения. В результате разгерметизации всё содержимое емкости свободно вылилось на подстилающую поверхность.

Дано:

1. Тип АХОВ – водород мышьяковистый.
 2. Количество АХОВ, $Q_0 = 60$ т.
 3. Метеоусловия на момент аварии:
 - скорость ветра 2 м/с,
 - инверсия,
 - температура воздуха 0 °С.
 4. Расстояние от места аварии до поселения (х) – 2500 м
 5. Протяженность поселения по оси ветра (x^1) – 2000 м.
- Направление ветра в сторону поселения.

Требуется определить:

1. Глубину зоны заражения через 2 часа после аварии.
2. Продолжительность поражающего действия АХОВ.
3. Время подхода АХОВ к поселению, время полного заражения поселения.
4. Площадь зоны возможного заражения и площадь зоны фактического заражения.
5. Вид зоны возможного заражения.
6. Возможные потери людей.

Решение

1. Эквивалентное количество вещества по первичному облаку (тонны) определяется по формуле:

$$Q_{э1} = K_1 \times K_3 \times K_5 \times K_7 \times Q_0 ,$$

где Q_0 – количество выброшенного (разлившегося) при аварии вещества, 60 т; K_1 – коэффициент, зависящий от условий хранения АХОВ определяется по таблице; для мышьяковистого водорода $K_1 = 0,17$; K_3 – коэффициент, равный отношению пороговой токсодозы хлора к пороговой токсодозе другого АХОВ для водорода мышьяковистого $K_3 = 0,857$; K_5 – коэффициент, учитывающий степень вертикальной устойчивости воздуха, принимается для инверсии $K_5 = 1$; K_7 – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха, при температуре 0 °С для исследуемого АХОВ $K_7 = 0,8$.

$$Q_{э1} = 0,17 \times 0,857 \times 1 \times 0,8 \times 60 = \mathbf{6,993 \text{ т}}$$

2. Эквивалентное количество вещества по вторичному облаку рассчитывается по формуле:

$$Q_{\Sigma 2} = (1 - K_1) K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 \frac{Q_0}{h \cdot d},$$

где K_2 – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств АХОВ, для водорода мышьяковистого $K_2 = 0,054$; K_4 – коэффициент, учитывающий скорость ветра, при скорости ветра 2 м/с $K_4 = 1,33$; K_6 – коэффициент, зависящий от времени, прошедшего после начала аварии N .

Значение коэффициента K_6 определяется после расчёта продолжительности испарения вещества T :

$$T = \frac{h \times d}{K_2 \times K_4 \times K_7},$$

где h – толщина слоя АХОВ, для свободного розлива $h = 0,05$ м; d – плотность АХОВ, т/м³, $d = 1,64$ т/м³;

$$T = (1,64 \times 0,05) / (0,054 \times 1,33 \times 1) = 1,14 \text{ час.}$$

Поскольку $N > T$ то $K_6 = T^{0,8} = 1,14^{0,8} = 1,11$

$$Q_{\Sigma 2} = (1 - 0,17) \times 0,054 \times 0,857 \times 1,33 \times 1 \times 1,11 \times 1 \times 60 / \\ / (1,64 \times 0,05) = 41,5 \text{ т}$$

3. Определяем глубину зон заражения первичным облаком при скорости ветра 2 м/с и $Q_{\Sigma 1} = 6,993$ т

Поскольку в таблице нет значений $Q_{\Sigma 1} = 6,993$ т, используем метод интерполяции, для чего находим ближайшие значения Γ_1 к $Q_{\Sigma 1} = 8,64$ км.

Это $\Gamma'_1 = 7,2$ км для $Q'_{\Sigma 1} = 5$ т

$\Gamma''_1 = 10,83$ км для $Q''_{\Sigma 1} = 10$ т,

$$\text{Искомое значение } \Gamma_1 = 7,2 + \frac{10,83 - 7,2}{10 - 5} (6,993 - 5) = 8,64 \text{ км}$$

4. Определяем глубину зоны заражения вторичным облаком для $Q_{\Sigma 2} = 41,5$ т для скорости ветра 2 м/с. Также используем метод интерполяции.

$$\text{Искомое значение } \Gamma_2 = 21,02 + \frac{28,73 - 21,02}{50 - 30} (41,5 - 30) = 29,77 \text{ км}$$

Полная глубина зоны заражения Γ (км), обусловленная воздействием первичного и вторичного облака АХОВ, определяется по выражению:

$$\Gamma = \Gamma^I + 0,5\Gamma^{II} = 25,45 + 0,5 \times 8,64 = 25,9 \text{ км},$$

где Γ^I – **максимальное** значение из Γ_1 и Γ_2 .

Полученное значение Γ сравнивается с предельно возможным значением глубины переноса воздушных масс $\Gamma_{\text{п}}$, определяемым по формуле

$$\Gamma = N \times v,$$

где N – время от начала аварии, $N = 2$ ч; v – скорость переноса переднего фронта АХОВ при данных степени устойчивости воздуха (инверсия) и скорости ветра 2 м/с, $v = 10$ км/ч.

$$\Gamma = 2 \times 10 = 20 \text{ км}$$

За окончательную расчётную глубину зоны заражения принимается **меньшее из 2-х** сравниваемых между собой значений Γ и $\Gamma_{\text{п}}$. Окончательная глубина зоны заражения 20 км.

5. Площадь зоны возможного заражения ($S_{\text{в}}$, км²) первичным (вторичным) облаком АХОВ определяется по формуле

$$S_{\text{в}} = 8,72 \times 10^{-3} \times \Gamma^2 \times \varphi = 8,72 \times 10^{-3} \times 20^2 \times 90 = 331,9 \text{ км}^2,$$

где φ – угловые размеры зоны возможного заражения в зависимости от скорости ветра, град.

6. Площадь зоны фактического заражения ($S_{\text{ф}}$ в км²) рассчитывается по формуле

$$S_{\text{ф}} = K_8 \times \Gamma^2 \times N^{0,2} = 0,081 \times 20^2 \times 2^{0,2} = 37,2 \text{ км}^2,$$

где K_8 – коэффициент, зависящий от степени вертикальной устойчивости воздуха, принимается $K_8 = 0,081$ при инверсии; N – время, прошедшее после начала аварии, $N = 2$ ч.

7. Время подхода облака АХОВ к поселению и определяется по формуле

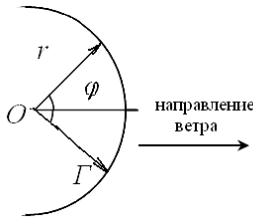
$$t = x / v = 2,5 / 10 = 0,25 \text{ ч},$$

где x – расстояние от источника заражения до поселения, км; v – скорость переноса переднего фронта облака АХОВ, км/ч.

Время полного заражения поселения (t^1) определяется по выражению:

$$t^1 = (x + x^1) / v = (2,5 + 2) / 10 = 0,45 \text{ ч}$$

8. Определим вид зоны возможного заражения. При скорости ветра 2 м/с и угловых размеров $\varphi = 90^\circ$, радиус $r = \Gamma = 20$ км и имеет следующий вид:



9. Возможные потери людей определяем в соответствии с таблицей.

ВОПРОСЫ

1. Как расшифровывается аббревиатура АХОВ?
2. Что понимают под первичным облаком? Вторичным облаком?
3. Что такое эквивалентное количество АХОВ?
4. Как определяется площадь зоны возможного заражения АХОВ?

ЛИТЕРАТУРА

1. Определение масштабов заражения аварийно химически опасными веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах: метод. разработка к практ. занятию/ ШТУ; Сост.: В. Б. Чернецов и др. – Н. Новгород, 2003. – 15 с.
2. Владимиров, В. А. Сильнодействующие ядовитые вещества и защита от них / В. А. Владимиров. – М.: Воениздат, 1989. – 176 с.
3. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте / Штаб ГО СССР. – М.: 1990. – 27 с.
4. Защита населения в районах размещения химически опасных объектов. Метод рекомендации I ГПИ; сост.: В.Б. Чернецов. – Горький, 1990. – 20 с.
5. Определение масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях на химически опасных объектах: Метод. указания / ГПИ; сост.: Н. М. Терехин. – Н. Новгород, 1992. – 11 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.

ОЦЕНКА РИСКА УГРОЗЫ ЗДОРОВЬЮ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОРОГОВЫХ ТОКСИКАНТОВ

В воде водохранилища обнаружено вещество с концентрацией C . Водохранилище является источником питьевого водоснабжения. Ежегодно человек уезжает из этой местности в отпуск, в котором проводит в среднем 30 дней. Пороговая мощность дозы загрязнителя при попадании в организм с водой составляет H_D . Скорость поступления воды в организм человека $v = 2$ л/сут. Средняя масса взрослого человека $P = 70$ кг. Усредненное время воздействия токсиканта $T = 30$ лет $= 10\,950$ сут.

Сравнить концентрацию токсиканта с его ПДК. Рассчитать риск угрозы здоровью человека, пьющего такую воду в течение количества лет T_p .

Таблица 1 – Варианты задачи

№ варианта Исходные данные	1	2	3	4	5	6
Токсикант	фенол	фенол	бензол	бензол	кадмий	кадмий
C , мг/л	3	30	0,01	0,1	0,01	0,1
T_p , лет	3	5	3	5	3	5
H_D , мг/(кг·сут)	0,6	0,6	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$

№ варианта Исходные данные	7	8	9	10	11	12
Токсикант	ртуть	ртуть	никель	никель	марганец	марганец
C , мг/л	0,005	0,05	0,1	1,0	0,1	1,0
T_p , лет	3	5	3	5	3	5
H_D , мг/(кг·сут)	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	0,02	0,02	0,14	0,14

Методические указания

Расчет риска угрозы здоровью, вызванной загрязнением

Загрязнение гидросферы приводит к попаданию вредных веществ в пищевые цепи, в том числе и те, в которых конечным потребителем (консументом) является человек.

Типичный путь загрязнителей: выброс в поверхностные воды (реки, озера) → водная флора и фауна → рыба → человек.

Как оценить угрозу здоровью, вызванную загрязнением среды обитания? Теория риска позволяет рассчитать вероятность вреда, вызванного попаданием ядовитых веществ в организм человека. Такой расчет может послужить основой для принятия тех или иных профилактических мер.

Что означает рассчитать риск угрозы здоровью? Представим, что в питьевой воде (например, в колодце) обнаружено некоторое количество какого-то тяжелого металла (или пестицида, или нефтепродукта, или радиоактивного вещества). Предположим, что концентрация выявленного загрязнителя оказалась равной его предельно допустимой концентрации (ПДК). Насколько, в среднем, может сократиться жизнь человека, пьющего такую воду на протяжении, скажем, двух лет? Теория риска способна дать ответ на поставленный вопрос, который может быть, например, таким: опасность невелика, но риск не является нулевым, среднее сокращение жизни человека может составить, к примеру, 5 дней.

Теперь представим, что в воде колодца соседней местности обнаружен какой-то другой загрязнитель, концентрация которого также оказалась равной его ПДК в воде. Какова угроза здоровью в этом случае? С помощью теории риска можно получить такой ответ: если человек будет пить эту воду в течение двух лет (как и в первом случае), то продолжительность его жизни сократится, но уже, например, на 25 дней. Следовательно, очистке воды второго колодца следует отдать предпочтение, именно туда надо направить имеющиеся силы и средства.

Таким образом, использование концепции риска позволяет делать количественный прогноз последствий загрязнения окружающей среды, в том числе и гидросферы.

Об экологическом нормировании

Под экологическим нормированием понимается совокупность требований к качеству окружающей среды. Целью таких требований

является ограничение степени загрязнения компонентов среды обитания. Возможны разные подходы к экологическому нормированию.

Санитарно-гигиеническое нормирование основано на концепции предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в почвах, воздухе, поверхностных и подземных водах, в продуктах питания. Термин ПДК подразумевает такую концентрацию химического элемента и/или его соединений в компонентах среды обитания, которая при повседневном влиянии на организм человека в течение длительного времени не вызывает паталогических изменений или заболеваний, устанавливаемых современными методами исследований в любые периоды жизни настоящего и последующего поколений [1].

Другой подход к экологическому нормированию основан на введении ограничений не на уровень вредных веществ в отдельных средах, а на общий объем выбросов, определяющий их поступление в среду обитания. Дело в том, что ориентация только на ПДК привела к тому, что задачи по достижению их уровней все чаще стали решать путем более эффективного рассеивания загрязнителей. Для этого стоки промышленных предприятий разбавлялись чистой водой, а выбросы газов и аэрозолей производились через дымовые трубы большой высоты. В английском языке появилась «экологическая» поговорка: «The best solution for pollution is dilution» («Наилучшее решение проблемы загрязнения – разбавление»).

Но рассеивание далеко не всегда снижает уровень загрязнения среды обитания. Экологические исследования показали, что в районах крупных промышленных центров при концентрациях токсикантов в атмосфере на уровне ПДК неизбежно происходит накопление одного или нескольких таких токсикантов в каком-либо компоненте окружающей среды. Например, было показано, что при содержании ртути в воздухе, расной ПДК, за счет атмосферных осадений на почвы и последующего смыва концентрация этого элемента в водоемах может в десятки раз превысить ПДК в воде [2].

Таким образом, подход к экологическому нормированию, ориентированный на общий объем выбросов, должен определить значения предельно допустимых выбросов (ПДВ) и сбросов (ПДС) загрязняющих веществ в окружающую среду. Эти значения должны соответствовать установленным предельным нагрузкам на экосистемы и тем самым сохранять их стабильность.

В документе «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды центральных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества» (СанПиН 2.1.4.1074-01) приведены значения ПДК за-

грязнителй питьевой воды, действующие в России [3]. Данные по ПДК некоторых неорганических и органических веществ в питьевой воде приведены соответственно в табл. 2 и 3.

Таблица 2 – Данные по ПДК некоторых неорганических веществ

Вещества	ПДК, мг/л	Вещества	ПДК, мг/л
Алюминий	0,5	Мышьяк	0,05
Барий	0,1	Никель	0,1
Бериллий	0,0002	Нитраты	45
Бор	0,5	Ртуть	0,0005
Железо	0,3	Свинец	0,03
Кадмий	0,001	Селен	0,01
Марганец	0,1	Стронций	7,0
Медь	1,0	Хром (VI)	0,05
Молибден	0,25	Цинк	5,0

Таблица 3 – Данные по ПДК некоторых органических веществ

Вещества	ПДК, мг/л
Бензол	0,01
Хлорбензол	0,02
Нитробензол	0,2
Фенол	0,001
Дихлорфенол	0,002
Трихлорфенол	0,004
Трифенилфосфит	0,01
Четыреххлористый углерод	0,006
ДДТ (сумма изомеров)	0,002

Кроме ПДК, используется термин «допустимая среднесуточная доза (ДСД)», выражаемая среднесуточным количеством мг вещества, отнесенного на один кг массы тела.

С целью количественного оценивания степени техногенного воздействия на экосистемы было предложено использовать биогеохимические показатели. По биогеохимическим показателям состояния экосистем на территории России можно выделить зоны четырех типов [4]:

I – зоны экологической нормы, которым соответствует класс удовлетворительного состояния среды;

II – зоны экологического риска, которым соответствует класс условно удовлетворительного состояния среды;

III – зоны экологического кризиса, которым соответствует класс неудовлетворительного состояния среды;

IV – зоны экологического бедствия, которым соответствует класс катастрофического состояния среды.

В соответствии с новым подходом к экологической безопасности, основанным на концепции риска, различают индивидуальный и коллективный риски.

Индивидуальный риск определяется вероятностью экстремального вреда – смерти индивидуума от некоторой причины, рассчитываемой для всей его жизни или для одного года.

Коллективный риск чаще всего определяют количеством смертей от некоторой причины, действующей в течение определенного интервала времени (например, в течение 5 лет) на определенное количество людей (например, 10 тыс. человек).

Два важнейших понятия – **максимально допустимый риск** и **пренебрежимо малый** (безусловно приемлемый) **риск**.

Риск признается пренебрежимым, если его уровень в силу своей малости не может быть надежно выявлен на фоне уже имеющихся рисков. В большинстве стран Западной Европы индивидуальный риск, которому подвергается население (а не работающий на производстве персонал), считается пренебрежимым, если его уровень не превышает величины 10^{-6} за год. Таким образом, значение пренебрежимого индивидуального риска составляет $1 \cdot 10^{-6} \text{ чел}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$. Это означает, что данная причина, действующая в течение одного года, увеличивает вероятность смерти от нее на одну миллионную. Иначе говоря, если эта причина действует в течение года на миллион человек, то от нее может погибнуть один человек [5, 6].

Для сравнения, в США индивидуальный допустимый риск, составляющий 10^{-6} , установлен не для одного года, а для всей жизни человека, средняя продолжительность которой принимается равной 70 годам. Следовательно, ежегодный индивидуальный допустимый риск составляет в США величину, равную $10^{-6}/70 = 1,43 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$.

Верхняя граница допустимого риска (максимально допустимый риск) различна у населения и персонала, работающего во вредных условиях. В России максимально допустимый индивидуальный риск для техногенного облучения лиц из персонала принят равным $1,0 \cdot 10^{-3}$ за год, а для населения – $5,0 \cdot 10^{-5}$ за год (последняя величина в 50 раз превышает уровень пренебрежимого риска, который в России принят равным 10^{-6} за год) [5]. Согласно нормативам Агентства США по

окружающей среде верхняя граница допустимого (приемлемого) риска от воздействия веществ с канцерогенными свойствами составляет 10^{-4} .

Каждое вредное вещество, попавшее в окружающую среду, создает риск угрозы здоровью. Этот риск зависит от дозы вещества, поступившей в организм человека. Зависимость риска от дозы загрязнителя может быть различной, основные виды этой зависимости представлены на рисунке.

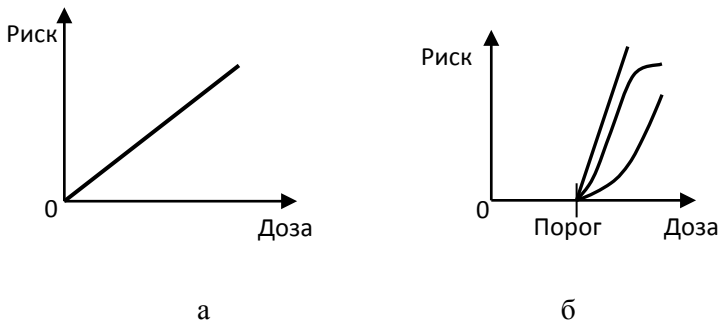


Рисунок - Зависимость риска угрозы здоровью от дозы загрязнителя:
а – линейная зависимость (беспороговый загрязнитель);
б – сложная связь (пороговый загрязнитель)

Первым видом зависимости характеризуются загрязнители, негативное действие которых начинается уже при очень малых дозах. Такие вещества называются **беспороговыми**. Негативные эффекты, обусловленные воздействием многих беспороговых загрязнителей, растут прямо пропорционально их дозе, которая, в свою очередь, прямо пропорциональна концентрации загрязнителя в воздухе, воде или продуктах питания. Это линейная связь между риском и дозой загрязнителя, она представлена на рис. (а). Линейной зависимостью риска от дозы характеризуются канцерогены – как нерадиоактивные, так и радионуклиды, действие которых приводит к внутреннему или внешнему облучению человека.

Зависимостью второго вида обладают **пороговые** загрязнители, действие которых вызывает негативные последствия, только когда величина дозы превзойдет некоторое пороговое значение. Один из вариантов такой зависимости риска от дозы представлен на рис. (б). Считается, что пороговыми загрязнителями являются токсические, но неканцерогенные вещества.

Доза загрязнителя D определяется произведением его концентрации в воздухе, питьевой воде или пищевых продуктах C , ско-

рости его поступления в организм v и временем поступления в организм t :

$$D = C \times v \times t.$$

Концентрацию C для воды выражают в мг/л, для воздуха – в мг/м³, для продуктов питания – в мг/кг. Скорость (интенсивность) поступления v измеряется в л/сутки для воды, для воздуха – в л/мин. или м³/сутки, для продуктов питания – в кг/день или кг/год.

Для расчета рисков, обусловленных присутствием вредных веществ в компонентах среды обитания, необходимо знать стандартные количества воздуха, воды, поступающих в организм человека, а также средние количества продуктов питания. В табл. 4 приведены стандарты объема воздуха и массы воды, поступающие в организм взрослого человека [6].

Таблица 4 – Стандарты объема воздуха и массы воды, поступающие в организм взрослого человека

Контингент	Воздух	Вода
Население	$7,3 \cdot 10^6$ л/год = 20 м ³ /сут	730 л/год = 2 л/сут
Персонал	$2,5 \cdot 10^6$ л/год = 10 м ³ /день (если в году 250 рабочих дней)	0

Оценка риска угрозы здоровью при воздействии пороговых токсикантов

Негативное воздействие должно характеризоваться значением той **пороговой дозы** (или **мощности дозы**, т. е. величиной дозы, отнесенной к некоторому интервалу времени), начиная с которой появляются неблагоприятные последствия. Практика исследований зависимости между значением дозы токсиканта и его действием (эффектом) показала, что возможно несколько подходов к установлению величины пороговой мощности дозы. Соответственно возможно использование следующих значений, выявляемых опытным путем (как правило, по результатам экспериментов с животными):

- H_{NOEL} – наибольшая пороговая мощность дозы, которая не приводит к появлению каких бы то ни было статистически значимых биологических эффектов (NOEL – «no-observed-effect-level», т. е. уровень, при котором никакие эффекты не наблюдаются);

- H_{NOAEL} – наибольшая мощность дозы, которая не приводит к появлению статистически значимых неблагоприятных биологиче-

ских эффектов (NOAEL – «no-observed-adverse-effect-level», т. е. уровень, при котором не наблюдаются неблагоприятные эффекты);

- H_{LOEL} – наименьшая мощность дозы, которая приводит к появлению каких бы то ни было статистически значимых биологических эффектов (LOEL – «lowest-observed-effect-level», т. е. наинизший уровень, при котором наблюдаются эффекты);

- H_{LOAEL} – наименьшая мощность дозы, которая приводит к появлению статистически значимых неблагоприятных биологических эффектов (LOAEL – «lowest-observed-adverse-effect-level», т. е. наинизший уровень, при котором наблюдаются неблагоприятные эффекты).

Все четыре величины измеряются количеством загрязнителя, поступающего в единицу времени в организм человека или животного и нормированного на единицу массы тела. Обычно количество токсиканта измеряется в миллиграммах, единицей времени служит день (сутки), а единицей массы тела – килограмм; следовательно, размерность перечисленных величин – мг/(кг·сут).

Оптимальное согласование экспериментальных данных и результатов наблюдений над группами риска означает, что имеется достаточная информация по всем перечисленным выше факторам. Однако на практике такое согласование обеспечить не удастся. Поэтому приходится вводить коэффициенты неопределенности, которые играют роль своеобразного «запаса надежности» в процессе вычисления мощности дозы. Обычно используют три коэффициента: F_1 , F_2 и F_3 , на их произведение делят величину пороговой мощности дозы:

$$H_D = \frac{H_{D(i)}}{F_1 \times F_2 \times F_3}, \quad (27)$$

где $H_{D(i)}$ – любое из представленных выше значений пороговой мощности дозы, а H_D – ее скорректированное значение.

Коэффициент F_1 используется для учета возможных межвидовых вариаций в проявлении эффектов от одной и той же мощности дозы, т. е. он характеризует межвидовые различия в чувствительности к токсиканту. Если биокинетические особенности токсиканта и механизмы его токсичности у экспериментальных животных и людей различаются сильно, то коэффициенту F_1 приписывают максимальное значение, равное 10. Если биокинетика и механизмы токсичности у экспериментальных животных и людей схожи, то $F_1 = 1$.

Коэффициент F_2 ответственен за внутривидовые различия в действии токсиканта, которые обусловлены индивидуальной чувстви-

тельностью. Его значения могут меняться от 1 до 10; также обычно полагают $F_2 = 1$, если существенные индивидуальные различия в чувствительности к данному токсиканту не выявлены.

Коэффициент F_3 повышает надежность расчетов, связанных с переходом от сравнительно кратковременных наблюдений к оценкам эффектов на значительно больший период времени. Значение этого коэффициента может варьироваться от 10 до 100. Когда тербуется оценить H_{NOEL} или H_{NOAEL} для всей жизни животного или человека, а имеются данные только по кратковременным экспериментам, то полагают $F_3 = 10$. Для оценки же H_{LOEL} или H_{LOAEL} при тех же условиях используется максимальное значение $F_3 = 100$.

Таким образом, введение коэффициентов неопределенности F_1 , F_2 и F_3 существенно снижает значение пороговой мощности дозы, что обусловлено влиянием ряда неопределенностей. Максимальное значение произведения коэффициентов $F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 = 10 \cdot 100 \cdot 10 = 10\,000$.

Можно сказать, что эти коэффициенты выполняют роль факторов переставки, так как в расчеты риска будут входить намеренно заниженные значения пороговой мощности дозы. Например, для тетраэтилсвинца в результате опытов с животными было получено значение H_{LOAEL} , равное 0,0012 мг/(кг·сут). Но из-за несовершенства условий экспериментов коэффициентам неопределенности пришлось приписать наибольшие значения, поэтому скорректированное значение пороговой мощности дозы H_D при поступлении этого токсиканта с водой или пищей составило $0,0012 / 10\,000 = 1,2 \cdot 10^{-7}$ мг/(кг·сут).

В случае другого токсиканта – фенола – выполненные эксперименты характеризовались существенно меньшей неопределенностью, произведение $F_1 \cdot F_2 \cdot F_3$ оказалось равным 100. Поскольку значение H_{NOAEL} было при поступлении фенола с водой или пищей равно 60 мг/(кг·сут), скорректированное значение пороговой мощности дозы H_D составило $60 / 100 = 0,6$ мг/(кг·сут).

Единица мощности пороговой дозы – мг/(кг·сут) – связана зависимостью воздействия поступающего в организм токсиканта от массы тела. Перед тем, как зафиксировать значение этой дозы для людей, проводятся опыты на животных, причем используются, как правило, несколько групп животных, для каждой из них принимается средняя величина массы тела. Часто объектами таких опытов становятся мыши, крысы, морские свинки и кролики.

Значения пороговой мощности дозы H_D при поступлении некоторых токсикантов-неканцерогенов с водой и пищей приведены (в порядке убывания пороговой мощности дозы) в табл. 5 и 6 [7].

Таблица 5 – Значения пороговой мощности дозы H_D при поступлении некоторых токсикантов-неканцерогенов неорганической природы с водой и пищей

Токсиканты, поступающие с водой и пищей	H_D , мг/(кг·сут)	Токсиканты, поступающие с водой и пищей	H_D , мг/(кг·сут)
Нитраты	1,6	Селен	$5 \cdot 10^{-3}$
Хром (Cr^{3+})	1,0	Молибден	$5 \cdot 10^{-3}$
Цинк	0,3	Серебро	$5 \cdot 10^{-3}$
Барий	0,2	Хром (VI)	$5 \cdot 10^{-3}$
Бор	0,2	Кадмий	$5 \cdot 10^{-4}$
Марганец	0,14	Сурьма	$4 \cdot 10^{-4}$
Хлор	0,1	Мышьяк	$3 \cdot 10^{-4}$
Медь	0,04	Ртуть (хлорид)	$3 \cdot 10^{-4}$
Никель	0,02	Таллий (хлорид, карбонат)	$8 \cdot 10^{-5}$

Таблица 6 – Значения пороговой мощности дозы H_D при поступлении некоторых токсикантов-неканцерогенов органической природы с водой и пищей

Токсикант, поступающий с водой и пищей	H_D , мг/(кг·сут)
Этиленгликоль	2
Ацетон	0,9
Нефтепродукты	0,6
Фенол	0,6
Метанол	0,5
Формальдегид	0,2
Пентахлорфенол $\text{C}_6\text{Cl}_5\text{OH}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Бензол	$4 \cdot 10^{-3}$
Винилхлорид	$3 \cdot 10^{-3}$
Нитробензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	$5 \cdot 10^{-4}$
ДДТ	$5 \cdot 10^{-4}$
Метилртуть $\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$	$1 \cdot 10^{-4}$
Тетраэтилсвинец	$1,2 \cdot 10^{-7}$

При решении задач, связанных с потреблением питьевой воды, среднесуточное поступление токсиканта с водой на 1 кг массы тела человека m определяется по следующей формуле [8]:

$$m = \frac{C \times v \times f \times T_p}{P \times T}, \quad (28)$$

где C – концентрация токсиканта в питьевой воде, мг/л; v – скорость поступления воды в организм человека, л/сут (считается, что взрослый человек выпивает ежедневно 2 л воды); f – количество дней в году, в течение которых происходит воздействие токсиканта; T_p – количество лет, в течение которых потребляется рассматриваемая питьевая вода; P – средняя масса взрослого человека, принимаемая равной 70 кг; T – усредненное время воздействия токсиканта (или средняя продолжительность возможного воздействия токсиканта за время жизни человека, принимаемое равным 30 годам (10 950 сут).

После того, как вычислено среднесуточное поступление токсиканта, отнесенное к 1 кг массы тела, рассчитывается величина, называемая **индексом опасности**. Ее обозначают через HQ (от слов Hazard Quotient) и определяют выражением:

$$HQ = \frac{m}{H_D}, \quad (29)$$

где H_D – пороговая мощность дозы, значения которой приведены в табл. 1 и 2 (ЛР № 5 и 6).

Если $HQ < 1$, то опасности нет, риска угрозы здоровью нет. Если $HQ > 1$, то существует опасность отравления, которая тем больше, чем больше индекс HQ превышает единицу.

Если в воздухе, питьевой воде или в пище содержится несколько токсикантов, то полный индекс опасности HQ_t равен сумме индексов опасности отдельных токсикантов:

$$HQ_t = HQ_1 + HQ_2 + HQ_3 + \dots \quad (30)$$

Если $HQ_t < 1$, то опасности нет, риска угрозы здоровью отсутствует.

Пример решения задачи

Задача

В одном из колодцев обнаружен тяжелый металл – хром (VI), причем его содержание в воде этого колодца в десять раз превысило значение его ПДК для питьевой воды (0,05 мг/л). Данным колодцем

пользуются в течение 6 лет. Рассчитать индивидуальный риск угрозы здоровью.

Дано:

$$C = 10 \text{ ПДК} = 0,5 \text{ мг/л.}$$

$$v = 2 \text{ л/сут.}$$

$$T_p = 6 \text{ лет.}$$

$$f = 365 \text{ сут./год.}$$

$$P = 70 \text{ кг.}$$

$$T = 30 \text{ лет} = 10\,950 \text{ сут.}$$

$$H_D = 5 \cdot 10^{-3} \text{ мг/кг} \cdot \text{сут.}$$

Решение

Среднесуточное поступление токсиканта с водой на 1 кг массы тела человека:

$$m = \frac{C \times v \times f \times T_p}{P \times T} = \frac{0,5 \text{ (мг/л)} \times 2 \text{ (л/сут)} \cdot 365 \text{ (сут)} \times 6 \text{ (лет)}}{70 \text{ (кг)} \times 10\,950 \text{ (сут)}} = \frac{2190 \text{ (мг)}}{766\,500 \text{ (кг} \cdot \text{сут)}}$$
$$= 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ мг/кг} \cdot \text{сут.}$$

Индекс опасности:

$$HQ = \frac{m}{H_D} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3} \text{ (мг/кг} \cdot \text{сут)}}{5 \cdot 10^{-3} \text{ (мг/кг} \cdot \text{сут)}} = 0,58 < 1,$$

Опасности отравления нет, риска угрозы здоровью нет.

ВОПРОСЫ

1. Что означает пороговая доза для биологических объектов?
2. Чем определяется риск наступления неблагоприятных последствий?
3. Как рассчитывается поступление токсического вещества в организм?
4. Что такое индекс опасности и как он рассчитывается?

ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедева, А. Н., Лаврик О. Л. Природоохранное законодательство развитых стран: Аналит. обзор. В 3-х ч. Ч. 2. Защита окружающей среды от загрязнения: методы контроля и регулирования / А. Н. Лебедева, О. Л. Лаврик. – Новосибирск, 1992. – 360 с.
2. Исидоров, В. А. Введение в курс химической экотоксикологии / В. А. Исидоров. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1997. – 88 с.

3. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества.

4. Виноградов, В. В., Орлов, В. А., Снакин, В. В. Биотические критерии зон экологического бедствия России // Изв. РАН. Сер. геогр. – 1993. – № 5. – С. 77–89.

5. Ваганов, П. А., Ман-Сунг Им. Экологические риски. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. – 152 с.

6. Ваганов, П. А. Как рассчитать риск угрозы здоровью из-за загрязнения окружающей среды / П. А. Ваганов. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2008. – 129 с.

7. Integrated Risk Information System (IRIS). Substance List. US EPA // Режим доступа: <http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm?fuseaction=iris.showSubstanceList>

8. Kammen, D. M., Hassenzahk, D. M., Should We Risk It? Exploring Environmental, Health, and Technological Problem Solving. – Princeton: Princeton University Press, 1999. – 404 p.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. **ОЦЕНКА РИСКА УГРОЗЫ ЗДОРОВЬЮ ПРИ ВОЗДЕЙ-** **СТВИИ БЕСПОРОГОВЫХ ТОКСИКАНТОВ (НЕРА-** **ДИОАКТИВНЫХ КАНЦЕРОГЕНОВ)**

Рассчитать риск в виде количества дополнительных случаев онкологических заболеваний среди жителей поселка с населением N человек в результате потребления воды с содержанием канцерогена C . Такая вода потребляется в течение 30 лет, причем в течение каждого года она потребляется в среднем в течение 300 дней. Фактор риска F_r .

$$C = 25 \text{ мкг/л} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ мг/л};$$

$$v = 2 \text{ л/сут};$$

$$f = 300 \text{ сут/год};$$

$$F_r = 0,4 \text{ [мг/(кг·сут)]}^{-1};$$

$$T_p = 30 \text{ лет};$$

$$N = 10^4 \text{ чел};$$

$$P = 70 \text{ кг};$$

$$T = 70 \text{ лет}.$$

Таблица 1 – Варианты задачи

№ варианта Исходные данные	1	2	3	4	5	6
Канцероген	Хлорбензол		ДДТ		Трихлорэтилен	
N , человек	10^4	10^5	10^4	10^5	10^4	10^5
C , мг/л	0,01	0,05	0,001	0,01	0,05	0,07
$F_r = 0,4 \text{ [мг/(кг·сут)]}^{-1}$	0,27	0,27	0,3	0,3	0,4	0,4

№ варианта Исходные данные	7	8	9	10	11	12
Канцероген	Тетра- хлорэтилен		Бериллий, оксид		Бенз(а)пирен	
N , человек	10^4	10^5	10^4	10^5	10^4	10^5
C , мг/л	0,02	0,05	0,00 1	0,01	0,0001	0,0005
$F_r = 0,4 \text{ [мг/(кг·сут)]}^{-1}$	0,54	0,54	7,0	7,0	12	12

Методические указания

Оценка риска угрозы здоровью при воздействии беспоровых токсикантов (нерадиоактивных канцерогенов)

К канцерогенам относят вещества, воздействие которых достоверно увеличивает частоту возникновения опухолей (доброкачественных и/или злокачественных) в популяциях человека и/или животных и/или сокращает время развития этих опухолей. При оценке риска угрозы здоровью, обусловленного воздействием канцерогенных веществ, используют два важных положения. Во-первых, принято считать, что у канцерогенов нет пороговой дозы, их действие начинается уже при самых малых количествах, попавших в организм человека. Во-вторых, считается, что вероятность развития онкозаболеваний (т. е. канцерогенный риск) прямо пропорциональна количеству (дозе) канцерогена, введенного в организм. Совокупность этих двух положений называют беспороговой линейной моделью [1].

Линейный характер зависимости между канцерогенным риском и дозой канцерогенного вещества выражается простой формулой:

$$r = F_r \times D, \quad (31)$$

где r – индивидуальный канцерогенный риск; под ним следует понимать дополнительный риск (дополнительно к уже существующей вероятности заболеть раком) онкологического заболевания, вызываемый поступлением данного канцерогена; D – доза канцерогена, попавшего в организм человека; F_r – коэффициент пропорциональности между риском и дозой, называемый фактором риска.

Фактор риска F_r показывает, насколько быстро возрастает вероятность онкозаболевания при увеличении дозы канцерогена, поступившего в организм человека с воздухом, водой или пищей. Фактор риска еще называют коэффициентом наклона (Slope Factor), так как он характеризует угол наклона прямой зависимости «риск – доза» (рис. (а)). Очевидно, что чем больше угол наклона, тем больше угроза здоровью.

Единица фактора риска F_r – $[\text{мг}/(\text{кг} \cdot \text{сут})]^{-1}$; она обратно пропорциональна единице среднесуточного поступления канцерогена. Фактор риска количественно характеризует увеличение угрозы здоровью в результате ежедневного поступления данного канцерогена в количестве 1 мг, отнесенного к 1 кг массы тела человека.

Часто индивидуальный канцерогенный риск вычисляют по формуле

$$r = m \times F_r, \quad (32)$$

где m – среднесуточное поступление канцерогена с воздухом, водой или с пищей, отнесенное к 1 кг массы тела человека, мг/(кг·сут); F_r – фактор риска, выражаемый в $[\text{мг}/(\text{кг} \cdot \text{сут})]^{-1}$.

Удобство расчета риска r по этой формуле заключается в том, что в результате перемножения величин m и F_r получается безразмерная величина.

Значения факторов риска определяются, как правило, в результате опытов на животных.

В табл. 2 приведены значения факторов риска F_r (в порядке его возрастания) при поступлении в организм человека ряда канцерогенов с водой и пищей.

Таблица 2 – Фактор риска F_r при поступлении в организм человека ряда канцерогенов с водой и пищей

Канцерогены	F_r , [мг/(кг·сут)] ⁻¹	Канцерогены	F_r , [мг/(кг·сут)] ⁻¹
Свинец и его соединения	$8,5 \cdot 10^{-3}$	Тетрахлорэтилен	0,54
Хлороформ	$3,1 \cdot 10^{-2}$	Мышьяк	1,75
Бензол	$5,5 \cdot 10^{-2}$	Винилхлорид	1,9
Пентахлорфенол $\text{C}_6\text{Cl}_5\text{OH}$	0,12	Бериллий, оксид	7,0
Хлорбензол $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	0,27	Полихлорированные бифенилы	5,0
ДДТ	0,3	Бенз(а)пирен	12
Кадмий и его соединения	0,38	Бериллий (сульфат)	$3 \cdot 10^3$
Трихлорэтилен	0,4	Диоксины (смесь)	$1,6 \cdot 10^5$

Методика решения задач рекомендована Агентством по защите окружающей среды США [2].

При решении задач, связанных с потреблением питьевой воды, среднесуточное поступление m канцерогена с водой на 1 кг массы тела человека определяется по формуле:

$$m = \frac{C \times v \times f \times T_p}{P \times T}, \quad (33)$$

где C – концентрация канцерогена в питьевой воде, мг/л; v – скорость поступления воды в организм человека, л/сут (считается, что взрослый человек выпивает ежедневно 2 литра воды); f – количество дней в году, в течение которых происходит воздействие канцерогена; T_p – количество лет, в течение которых происходит воздействие канцерогена; P – средняя масса взрослого человека, принимаемая равной 70 кг; T – усредненное время воздействия канцерогена, в качестве которого принимается средняя продолжительность жизни человека, считающаяся равной 70 годам (25 550 сут).

После того, как вычислено среднесуточное поступление m канцерогена, приведенное к 1 кг массы тела человека, рассчитывают индивидуальный канцерогенный риск r по формуле 32.

Если $r \leq 10^{-6}$, индивидуальный канцерогенный риск считается пренебрежимо малым. Верхний предел допустимого индивидуально-го канцерогенного риска принимается равным 10^{-4} .

Если $r > 10^{-4}$, индивидуальный канцерогенный риск считается недопустимым.

В случае воздействия нескольких канцерогенов полный риск выражается суммой отдельных рисков:

$$r_t = r_1 + r_2 + \dots \quad (34)$$

Коллективный канцерогенный риск R определяется формулами:

$$R = r \cdot N, \quad (35)$$

$$R_t = r_t \cdot N, \quad (36)$$

где N – количество человек, подвергающихся данному риску.

Пример решения задачи

Задача

Рассчитать индивидуальный и коллективный риски угрозы здоровью для следующих условий. Содержание диоксинов в питьевой воде равно 10ПДК этих веществ в воде, ПДК составляет $2 \cdot 10^{-8}$ мг/л. Время потребления такой воды группой в 10^3 человек – 5 лет. Средняя частота потребления – 300 дней в году. Фактор риска при поступлении диоксинов с водой равен $1,6 \cdot 10^5$ [мг/(кг·сут)]⁻¹.

Дано:

$$C = 10\text{ПДК} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ мг/л.}$$

$$v = 2 \text{ л/сут.}$$

$$f = 300 \text{ сут/год.}$$

$$F_r = 1,6 \cdot 10^5 \text{ [мг/(кг} \cdot \text{сут)]}^{-1}.$$

$$T_p = 5 \text{ лет.}$$

$$N = 10^3 \text{ чел.}$$

$$P = 70 \text{ кг.}$$

$$T = 70 \text{ лет.}$$

Решение

Среднесуточное поступление диоксинов с питьевой водой на 1 кг массы тела человека:

$$m = \frac{C \times v \times f \times T_p}{P \times T} = \frac{2 \cdot 10^{-7} (\text{мг} / \text{л}) \cdot 2 (\text{л} / \text{сут}) \cdot 300 (\text{сут} / \text{год}) \cdot 5 (\text{лет})}{70 (\text{кг}) \cdot 25\,550 (\text{сут})} = \frac{6 \cdot 10^{-4} (\text{мг})}{1\,788\,500 (\text{кг} \cdot \text{сут})} = 3,4 \cdot 10^{-10} \text{ мг} / \text{кг} \cdot \text{сут.}$$

Индивидуальный канцерогенный риск:

$$r = m \times F_r = 3,4 \cdot 10^{-10} (\text{мг} / \text{кг} \cdot \text{сут}) \times 1,6 \cdot 10^5 ((\text{мг} / \text{кг} \cdot \text{сут})^{-1}) = 5,4 \cdot 10^{-5}.$$

Если привести к одному году, то индивидуальный риск будет равен $5,4 \cdot 10^{-5}$: $5 = 1,1 \cdot 10^{-5}$. Это значение ниже уровня допустимого риска, который считается равным $1 \cdot 10^{-4} \text{ чел}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$.

Коллективный риск $R = r \times N$, для условий данной задачи

$$R = 5,4 \cdot 10^{-5} \text{ чел}^{-1} \times 10^3 \text{ чел} = 0,054 < 1.$$

Таким образом, в рассматриваемом случае можно ожидать, что в течение 5 лет не будет наблюдаться ни одного дополнительного случая появления онкологического заболевания.

ВОПРОСЫ

1. Какие положения используются при оценке воздействия канцерогенных веществ?
2. Что такое индивидуальный канцерогенный риск?
3. Что такое фактор риска и в чем он измеряется?
4. Какая существует шкала канцерогенных рисков?

ЛИТЕРАТУРА

1. Ваганов, П. А., Ман-Сунг Им. Экологические риски. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2001. – 152 с.
2. Kammen, D. M., Hassenzahk, D. M., Should We Risk It? Exploring Environmental, Health, and Technological Problem Solving. – Princeton, Princeton University Press, 1999. – 404 p.
3. Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6.

ОЦЕНКА РИСКА УГРОЗЫ ЗДОРОВЬЮ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ БЕСПОРОГОВЫХ ТОКСИКАНТОВ (РАДИОАКТИВНЫХ КАНЦЕРОГЕНОВ)

Рассчитать дозу внешнего облучения при проживании на территории с плотностью загрязнения ^{137}Cs $37\,000\text{ Бк}\cdot\text{м}^2$, внешнего облучения от ^{137}Cs при объемной активности в воздухе $10^{-4}\text{ Бк}\cdot\text{м}^3$, ингаляционную дозу от ^{137}Cs , годовое поступление ^{137}Cs с продуктами питания, индивидуальный и коллективный риски, относительную и индивидуальную потерю жизни при облучении.

Таблица 1 – Варианты для выполнения лабораторной работы

Продукты	Вариант											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Удельная активность ^{137}Cs UA_i , $\text{Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$											
Хлеб	2	1	1	370	370	74	40	20	15	10	5	4
Картофель	5	3	3	740	370	74	80	40	20	10	10	6
Овощи	10	5	5	740	185	100	100	150	100	40	15	10
Фрукты	10	5	5	740	185	100	40	40	20	15	10	10
Мясо	20	10	10	590	600	370	180	150	100	70	50	50
Молоко	40	15	5	370	111	111	100	80	40	30	30	30
Грибы свежие	200	100	60	1850	370	370	370	370	370	370	300	250
Ягоды лесные	60	30	30	185	185	185	185	150	150	150	100	100

Примечание: каждый вариант задания соответствует содержанию ^{137}Cs в продуктах питания для различных условий или временного промежутка: вариант 1 – в Белорусском и Украинском Полесье в конце 1970-х гг.; вариант 2 – на территории Беларуси в конце 1970-х гг.; вариант 3 – средневзвешенное по территории бывшего СССР в конце 70-х гг.; вариант 4 – норматив ВДУ-88; вариант 5 – норматив РДУ-92; вариант 6 – норматив РДУ-96; вариант 7 – норматив РДУ-99; вариант 8–10 – удельная активность в продуктах питания в различные периоды после аварии на ЧАЭС; вариант 11–12 – типичные удельные активности ^{137}Cs в продуктах питания на современном этапе.

Методические указания

Оценка риска для здоровья человека при загрязнении радионуклидами

Радиационное воздействие на организм человека определяется внешним (D_{int}) и внутренним (D_{ext}) облучением.

$$D_{\text{total}} = D_{\text{int}} + D_{\text{ext}} \quad (37)$$

Доза внешнего облучения определяется преимущественно γ -излучением, вклад β -излучения выражен в гораздо меньшей степени и определяет воздействие на наружные покровы тела, α -излучение не определяет внешнего облучения объектов биоты и человека, задерживаясь в поверхностном слое кожи или одежды. Внешнее облучение обусловлено радионуклидами, находящимися, в первую очередь, в воздухе и на поверхности почвы:

$$D_{\text{ext}} = D_{\text{soil}}^{\text{corr}} + D_{\text{air}} \quad (38)$$

где $D_{\text{soil}}^{\text{corr}}$ – доза внешнего γ -излучения от поверхности почвы, Зв; D_{air} – доза внешнего γ -излучения от радионуклидов, рассеянных в атмосфере, Зв.

Доза внешнего λ -излучения от радионуклидов, находящихся в почве:

$$D_{\text{soil}} = A_{\text{soil}} \times B_{\text{soil}(\gamma)} \times t \quad (39)$$

где A_{soil} – удельная активность радионуклида в почве, Бк·м⁻²; $B_{\text{soil}(\gamma)}$ – дозовый коэффициент, Зв·м²·ч⁻¹·Бк⁻¹ (табл. 2); t – время, ч.

При расчете дозы внешнего облучения следует учесть, что от 0,1 до 0,4 времени в течение суток человек проводит на улице, а жилые постройки имеют определенное свойство к экранированию излучения (деревянные дома снижают интенсивность γ -излучения примерно в 10 раз). Соответственно, величина дозы внутреннего облучения должна быть скорректирована:

$$D_{\text{soil}}^{\text{corr}} = 0,46 \times D_{\text{soil}} \quad (40)$$

Доза внешнего γ -излучения от радионуклидов, находящихся в атмосфере:

$$D_{\text{air}} = A_{\text{air}} \times B_{\text{air}(\gamma)} \times t \quad (41)$$

где A_{air} – объемная активность радионуклида в почве, Бк·м⁻³; $B_{\text{air}(\gamma)}$ – дозовый коэффициент, Зв·м³·ч⁻¹·Бк⁻¹ (табл. 2, ЛР № 5); t – время, ч.

Доза внутреннего облучения определяется от алиментарного и ингаляционного поступления α - и β -излучающих радионуклидов, а роль γ -излучения в формирование дозы внутреннего облучения относительно мала.

Доза внутреннего облучения (D_{int}) обусловлена ингаляционным (D_{ing}) и алиментарным (D_{al}) поступлением радионуклидов:

$$D_{int} = D_{ing} + D_{al} \quad (42)$$

При этом ингаляционная доза будет равна:

$$D_{ing} = A_{air} \times B_{air(\beta\gamma)} \times V \times t \quad (43)$$

где A_{air} – объемная активность радионуклида в почве, Бк·м⁻³; $B_{air(\beta\gamma)}$ – дозовый коэффициент от ингаляции радионуклида, Зв·Бк⁻¹ (табл. 2); V – потребление воздуха, м³/ч; t – время, ч.

Таблица 2 – Дозовые коэффициенты

Радионуклид	Дозовые коэффициенты		Дозовый коэффициент при поступлении, Зв/Бк	
¹³⁷ Cs	$B_{air(\gamma)}$ Зв·м ³ ·ч ⁻¹ ·Бк ⁻¹	$B_{soil(\gamma)}$ Зв·м ² ·ч ⁻¹ ·Бк ⁻¹	$B_{air(\beta\gamma)}$	$B_{al(\beta\gamma)}$
	4,68·10 ⁻¹⁰	4,18·10 ⁻¹³	4,6·10 ⁻⁹	1,3·10 ⁻⁸

Доза внутреннего облучения от алиментарного поступления рассчитывается по формуле

$$D_{al} = 365 \times B_{al(\beta\gamma)} \times \sum_{i=1}^n m_i \times UA_i, \quad (44)$$

где m_i – масса i -го продукта, потребляемого в сутки (табл. 3), кг;

UA_i – удельная активность i -го продукта питания, Бк/кг;

B_{al} – дозовый коэффициент от перорального поступления, Зв/Бк.

Рассчитывается суммарная доза внешнего и внутреннего облучения по формуле 37. Исходя из величины полученной дозы рассчитывается индивидуальный радиационный риск (чел⁻¹):

$$r = D_{total} \times r_e, \quad (45)$$

где r_e – индивидуальный радиационный риск при дозе 1 Зв, принимаемый для населения равным 7,3·10⁻² чел⁻¹Зв⁻¹. Данный коэффициент характеризует сокращение длительности периода полноценной жизни в среднем на 15 лет на один стохастический (вероятностный) случай смертельного заболевания.

Применяется следующая шкала индивидуальных радиационных рисков воздействия:

- при $r_e < 10^{-6}$ индивидуальный риск рассматриваемого канцерогена считается **пренебрежимо малым**;
- при $10^{-6} < r_e < 5,0 \cdot 10^{-5}$ индивидуальный риск рассматриваемого канцерогена считается **приемлемым**.
- при $5,0 \cdot 10^{-5} < r_e$ индивидуальный риск рассматриваемого канцерогена считается **недопустимым**.

Таблица 3 – Примерное суточное потребление основных продуктов питания для сельских жителей

Продукты	Суточное потребление, кг
Хлеб	0,4
Картофель	0,474
Овощи	0,2
Фрукты	0,06
Мясо	0,11
Молоко	0,5
Грибы свежие	0,02
Ягоды лесные	0,009

Примечание: индивидуальный пищевой рацион может претерпевать значительное варьирование по сравнению с типичным как по перечню продуктов, так и по их массе. Приведенный рацион был использован при расчете гигиенических нормативов РДУ-99.

Коллективная доза K (чел·Зв) равна произведению индивидуальной дозы D_{total} (Зв) на численность облученной когорты N (чел):

$$K = D_{\text{total}} \times N \quad (46)$$

Коллективный радиационный риск R равен произведению коллективной дозы K (чел·Зв) на коэффициент индивидуального радиационного риска r_e (чел⁻¹ · Зв⁻¹):

$$R = K \times r_e \quad (47)$$

Коллективный риск отражает количество случаев проявления стохастических эффектов от действия излучения, каждый из которых определяет сокращение длительности периода полноценной жизни на $\beta = 15$ лет. Перемножая величину коллективной дозы K на величину β получаем потерю коллективной продолжительности жизни Δ :

$$\Delta = R \times \beta \quad (48)$$

Данный показатель позволяет рассчитать относительную потерю коллективной продолжительности жизни δ :

$$\delta = \frac{\Delta}{70 \times N} \quad (49)$$

Индивидуальное сокращение жизни человека от воздействия ионизирующего излучения при этом составит $\Delta_{\text{и}}$:

$$\Delta_{\text{и}} = 70 \times \delta \quad (50)$$

Пример решения задачи

Задача

Рассчитать дозу внешнего облучения при проживании на территории с плотностью загрязнения ^{137}Cs $30\,000\text{ Бк}\cdot\text{м}^2$, внешнего облучения от ^{137}Cs при объемной активности в воздухе $10^{-3}\text{ Бк}\cdot\text{м}^3$, ингаляционную дозу от ^{137}Cs , годовое поступление ^{137}Cs с хлебом (удельная активность ^{137}Cs $UA_i = 0,1\text{ Бк}\cdot\text{кг}^{-1}$), индивидуальный риск.

Решение

Доза внешнего λ -излучения от радионуклидов, находящихся в почве:

$$D_{\text{soil}} = A_{\text{soil}} \times B_{\text{soil}(\gamma)} \times t = 3 \times 10^4 \times 4,18 \times 10^{-13} \times 8,76 \times 10^3 = 1,1 \times 10^{-4}\text{ Зв}$$

$$D_{\text{soil}}^{\text{corr}} = 0,46 \times 1,1 \times 10^{-4}\text{ Зв} = 5,1 \times 10^{-5}\text{ Зв}$$

Доза внешнего γ -излучения от радионуклидов, находящихся в атмосфере:

$$D_{\text{air}} = A_{\text{air}} \times B_{\text{air}(\gamma)} \times t = 10^{-3} \times 4,68 \times 10^{-10} \times 8,76 \times 10^3 = 4,1 \times 10^{-9}\text{ Зв}$$

Ингаляционная доза будет равна:

$$D_{\text{ing}} = A_{\text{air}} \times B_{\text{air}(\beta\gamma)} \times V \times t = 10^{-3} \times 4,6 \times 10^{-9} \times 0,83 \times 8,76 \times 10^3 = 3,3 \times 10^{-8}\text{ Зв}$$

Доза внутреннего облучения от алиментарного поступления:

$$D_{\text{al}} = 365 \times 1,3 \times 10^{-8} \times 0,4 \times 0,1 = 1,9 \times 10^{-7}\text{ Зв}$$

Суммарная доза внешнего и внутреннего облучения равна:

$$5,1 \times 10^{-5} + 4,1 \times 10^{-9} + 3,3 \times 10^{-8} + 1,9 \times 10^{-7} \approx 5,1 \times 10^{-5}\text{ Зв}$$

Индивидуальный радиационный риск (чел $^{-1}$):

$$r = D_{\text{total}} \times r_e = 5,1 \times 10^{-5} \times 7,3 \times 10^{-2} = 3,7 \times 10^{-6}\text{ чел}^{-1}$$

Так как $10^{-6} < r_e < 5,0 \times 10^{-5}$ индивидуальный риск можно считать приемлемым.

ВОПРОСЫ

1. Какие пути поступления радионуклидов в организм человека Вы знаете?
2. Какой показатель характеризует поступление радионуклидов в организм?
3. Какие радионуклиды обладают наибольшей кратностью накопления?
4. Каким излучением обусловлено внешнее облучение человека?
5. Каким излучением обусловлено внутреннее облучение человека?
6. Как можно ориентировочно рассчитать поступление ^{137}Cs в организм человека?
7. Как рассчитывается индивидуальный радиационный риск? Какая величина риска считается допустимой?

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев, Н. Г. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
2. Романов, Г. Н. Ликвидация последствий радиационных аварий: Справочное руководство / Г. Н. Романов. – М.: ИздАТ, 1993. – 336 с.
3. Методика разработки нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух (ДВ-2010). – Т. 2 (технические приложения, рекомендации для расчетов). – М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 216с.
4. Проведение комплексного экспедиционного радиационно-гигиенического обследования населенного пункта для оценки доз облучения населения. Методические рекомендации – М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 48 с.

Учебное издание

Сыса Алексей Григорьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
И ОЦЕНКА РИСКОВ ТЕХНОГЕННОГО
И РАДИОНУКЛИДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие

Редактор *А. В. Красуцкая*
Компьютерная верстка *М. Ю. Мошкова*
Корректор *А. В. Красуцкая*

Подписано в печать 03.04.2017. Формат 60×90 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 3,75. Уч.-изд. л. 2,07.

Тираж 50 экз. Заказ № 193.

Республиканское унитарное предприятие «Информационно-
вычислительный центр Министерства финансов Республики Беларусь».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 1/161 от 27.01.2014, № 2/41 от 29.01.2014.

Ул. Кальварийская, 17, 220004, г. Минск.